
Die Qualität der Sprachproduktion bei gehörlosen Patienten mit Cochlea Implantaten im Hinblick auf die Dauer und den Zeitpunkt der Ertaubung

Suzan Fröhner



München 2018

Aus der Klinik und Poliklinik für Hals-, Nasen- und Ohrenheilkunde
der Ludwig-Maximilians-Universität München
Univ. -Prof. Dr. med. Martin Canis

Die Qualität der Sprachproduktion bei gehörlosen Patienten mit Cochlea Implantaten im Hinblick auf die Dauer und den Zeitpunkt der Ertaubung

Dissertation
zum Erwerb des Doktorgrades der Medizin
an der Medizinischen Fakultät der
Ludwig-Maximilians-Universität zu München

vorgelegt von
Suzan Fröhner, geb. Ruff
aus Berlin
2018

Mit Genehmigung der Medizinischen Fakultät
der Universität München

Berichterstatterin: Prof. Dr. med. Maria Schuster

Mitberichterstatter: PD Dr. Sebastian Schröder
PD Dr. Jesus Bujia

Dekan: Prof. Dr. med. dent. Reinhard Hickel

Tag der mündlichen Prüfung: 20.12.2018

Eidesstattliche Versicherung

Fröhner, Suzan Vanessa

Name, Vorname

Ich erkläre hiermit an Eides statt,

dass ich die vorliegende Dissertation mit dem Thema

Die Qualität der Sprachproduktion bei gehörlosen Patienten mit Cochlea Implantaten
im Hinblick auf die Dauer und den Zeitpunkt der Ertaubung

selbständig verfasst, mich außer der angegebenen keiner weiteren Hilfsmittel bedient und
alle Erkenntnisse, die aus dem Schrifttum ganz oder annähernd übernommen sind, als
solche kenntlich gemacht und nach ihrer Herkunft unter Bezeichnung der Fundstelle
einzeln nachgewiesen habe.

Ich erkläre des Weiteren, dass die hier vorgelegte Dissertation nicht in gleicher oder in
ähnlicher Form bei einer anderen Stelle zur Erlangung eines akademischen Grades
eingereicht wurde.

Königs Wusterhausen, den 21.12.2018

Ort, Datum

Suzan Fröhner

Unterschrift Doktorandin/Doktorand

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
1.1 Bisherige Studienlage und Ableitung der Ziele.....	2
1.2 Ziele der Studie und Ausblick für weitere Studien	5
2. Hintergrund	7
2.1 Das Ohr und seine physikalischen Hintergründe	7
2.1.1 Anatomie (Äußeres Ohr, Mittelohr, Innenohr).....	9
2.1.2 Hörphysiologie (Corti-Organ)	10
2.1.3 Die zentrale Hörbahn.....	12
2.1.4 Hörstörungen und ihre Einteilung	13
2.1.5 Prävalenz und Ursachen für Hörstörungen.....	13
2.1.6 Cochlea Implantat.....	14
2.2 Sprache	17
2.2.1 Sprache und Ihre Funktionsweise.....	17
2.2.2 Sprachentwicklung	19
2.2.3 Sprachzentren – Sprachperzeption bis Sprachproduktion	19
2.2.4 Der Sprechapparat	20
2.2.5 Schallproduktion.....	20
2.2.6 Klangproduktion/ Artikulation	21
2.2.7 DIVA-Theorie	22
2.2.8 Informationstheorie nach Shannon	24
3. Material und Methoden	25
3.1 Untersuchungskollektiv – CI-Träger und Kontrollgruppe	25
3.2 Gruppen	26
3.3 Sprachkorpus	26
3.4 ASR-System	27
3.5 Statistik.....	28
4. Ergebnisse	30
4.1 Studienteilnehmer und Kontrollgruppen	30
4.2 WR und beeinflussende Faktoren.....	31
4.3 Gruppenvergleich	32
5. Diskussion.....	34
5.1 Verwendung des ASR-Systems.....	35
5.2 Einflussfaktoren auf WR	36
5.3 WR versus Beginn und Dauer der Ertaubung	37

6. Zusammenfassung	40
7. Danksagung.....	41
8. Literaturverzeichnis	43
9. Abbildungs- und Tabellenverzeichnis	51
9.1 Abbildungen	51
9.2 Tabellen	51

1. Einleitung

Seit geraumer Zeit fragen sich Menschen welches Unterscheidungskriterium einen Menschen von einem Tier unterscheidet. Im Gegensatz zu den Theorien, in denen der Mensch als „werkzeugnutzendes Tier“ oder als „feuerbeherrschendes Tier“ dargestellt wurde, rückte in den letzten Jahrhunderten immer mehr die Fähigkeit zur Sprachproduktion und somit zur Verständigung als wesentliches Unterscheidungskriterium in den Blickpunkt der Wissenschaft. Sie wird von verschiedenen Fachbereichen, wie z. B. der Verhaltensforschung, der Linguistik, der Anthropologie, der Phonetik und der Medizin erforscht. Die Fachbereiche gehen teilweise fließend in einander über.

Die Sprachproduktion kann sich intraindividuell verändern. Hörverluste können beispielsweise zum limitierten Sprachverständnis führen. Im Verlauf modifizieren sie ebenso die Lautbildung der Betroffenen. Die Auswirkungen von Hörverlusten betreffen Kinder in vulnerablen Phasen des Spracherwerbs, aber auch Erwachsene nach vollendetem Spracherwerb. Es wurde nachgewiesen, dass sogar junge postlingual ertaubte Erwachsene, die zuvor eine normale Sprachentwicklung erfuhren, nach einer Ertaubung relevante Sprachverzerrungen aufwiesen. Es wurden Unterschiede in phonetischen, stimmlichen und prosodischen Aspekten und in der Resonanz detektiert (1). Die orale Kommunikation bei Schwerhörigen kann also wegen der herabgeminderten auditorischen Fähigkeiten eingeschränkt sein. Jedoch mindert die veränderte Lautbildung die lautsprachliche Kommunikationsfähigkeit zusätzlich zum Hörverlust – und zwar zu einem teilweise erheblichen Ausmaß.

Unterschiedliche Hörhilfen ermöglichen den Betroffenen heutzutage durch Wiederherstellung auditorischer Fähigkeiten die Kommunikation. Hierzu werden Hörgeräte, Mittelohr- und Innenohrprothesen verwendet. Cochlea Implantate (CI) zählen zu den Innenohrprothesen. Sie werden eingesetzt, wenn Hörgeräte nicht mehr zum ausreichenden Sprachverständnis beitragen können und ein hochgradiger oder kompletter peripherer Hörverlust vorliegt. Ein CI ersetzt die mechanisch-bioelektrische Transduktion im Innenohr und leitet die Information durch das Generieren von rein elektrisch verschlüsselten Impulsen zum Hörnerv. Hierfür wird die Sprache in Ihrem Hauptsprachspektrum von 250 Hz bis 4.000 Hz in einem Sprachprozessor in elektrische Impulse umgewandelt und anschließend durch die Haut zum retroaurikulär implantierten Empfänger geleitet. Über einen Elektrodenträger werden die elektrischen Impulse in die Cochlea geleitet. In den zweieinhalb Windungen der Cochlea wird je nach Ort und Stärke des elektrischen

Reizes eine tonotope auditive Reizwahrnehmung erzeugt. Dabei hält das CI die physiologische Frequenzdiskrimination ein: hohe Frequenzen werden nahe der Basis und tiefe Frequenzen werden nahe des Apex gehört.

Das CI als prothetische Versorgung ist seit den 80er Jahren des letzten Jahrhunderts vielfach erprobt und zählt nun zu den effektivsten Implantaten beim Menschen. Seine Effektivität beruht auf einer verbesserten Sprachperzeption und Diskrimination von Geräuschen und Warnsignalen, sowie einem verbesserten Spracherwerb bei prälingual (vor dem Spracherwerb) Ertaubten (2). Im Vergleich zur konventionellen Hörgeräteversorgung ist eine erhöhte Lebensqualität und Kosteneffizienz nachweisbar (3).

Die auditorischen Resultate werden nach einer Cochlea Implantat-Versorgung verbessert, können jedoch zwischen einzelnen CI-Nutzern stark variieren. In den allermeisten wissenschaftlichen Studien werden lediglich die Veränderungen der Sprachperzeption nach Implantation beschrieben. Es liegt nahe, dass prälingual ertaubte Kinder durch das fehlerhafte Erlernen von Lauten eine fehlerhafte Lautbildung aufweisen. Doch sensorische Sprachperzeption und motorische Sprachbildung interagieren komplex und nachhaltig miteinander. Veränderungen der Artikulation und somit der Sprachverständlichkeit eines Betroffenen standen bislang weniger im Fokus wissenschaftlicher Studien, obwohl diese auch zu Kommunikationseinschränkungen führen. Insbesondere fehlen Untersuchungen für Erwachsene nach CI-Versorgung.

1.1 Bisherige Studienlage und Ableitung der Ziele

Für CI-Träger sind die Anzahl der zugänglichen Sprachmerkmale geringer als für Normalhörende (4). Dies könnte an verschiedenen Faktoren liegen: einem eingeschränkten Senden von Signalen, dem Unvermögen solche Signale korrekt zu unterscheiden oder der limitierten Informationsverarbeitung. CIs bieten eine unterschiedliche Qualität der elektrischen Repräsentation der akustischen Umgebung und eine limitierte Frequenzrepräsentation. Nach einer Implantation sind phonetische und spektrale Änderungen der Sprachsignale zu erwarten. Aktuelle CIs sind auch nicht für das Übermitteln von tieferen Frequenzen, wie die Grundfrequenzen der menschlichen Stimme, ausgelegt; was ein starkes akustisches Merkmal für Intonationsfunktionen bei Normalhörern darstellt (5).

Dennoch können die Ergebnisse bezüglich Sprachperzeption und -produktion nach einer CI-Versorgung bemerkenswert sein, so ist es CI-Nutzern z. B. möglich, zwischen stimmhaften und stimmlosen Konsonanten zu unterscheiden (6).

Bereits in den Anfängen der CI-Implantationen wurden Veränderungen der Sprachproduktion von CI-Nutzern festgestellt: Der enorme Einfluss der auditorischen Rückmeldung auf die Sprachproduktion von Vokalen wurde 1991/ 1992 von Perkell et al. beschrieben. Sie untersuchten vier Probanden und stellten Veränderungen der spektralen Vokaleigenschaften fest, welche die Unterscheidung von Phonemen erleichterten. Außerdem wurden deutliche Unterschiede zwischen den vier Probanden aufgezeigt (7). Langzeitstudien mit einer geringen Anzahl an Probanden zeigten, dass die Vokal- und Diphthongproduktion nach der Implantation allmählich exakter wurden (8). 1994 wurde eine Kohorte von fünf gehörlosen Erwachsenen untersucht: Es profitierten insbesondere solche Probanden von einer CI-Versorgung, die zuvor eine falsche oder kaum unterscheidbare Artikulation von Sibilanten aufwiesen (9). In einer Langzeitstudie wurden Merkmale der zeitlichen Präzision der Stimmeinsätze, beim Wechsel von stimmlos-stimmhaft, betrachtet. Vier von fünf CI-Nutzern konnten die Stimmeinsätze durch die verbesserte auditorische Rückmeldung exakter planen (10). In einer Studie mit sieben erwachsenen Teilnehmern zeigte die wiedererlangte Hörfähigkeit einen geringen, aber nachweisbaren Effekt auf Vokale bezüglich der Koartikulation, also der Abhängigkeit vom voraus- und nachfolgenden Laut. Nach der CI-Versorgung wiesen die Vokale im Zentrum einer Silbe geringe Formantenänderungen auf (11). Im Jahr 2003 wurde der positive Effekt des CIs auf die Präzision der Artikulation von Vokalen bei zehn deutschsprachigen CI-Nutzern nachgewiesen (12). 2007 wurden Veränderungen in weiteren Aspekten der gesprochenen Sprache wie Stimme, Nasalität und Prosodie nach CI-Versorgung gefunden (13). 2015 zeigten Yang et al. Unterschiede in der Dauer gesprochener Vokale und in der Größe von Vokalräumen von 14 Mandarin sprechenden prälingual ertaubten Kindern im Vergleich zu einer normalhörenden Kontrollgruppe (14).

Die bisherige Literatur zeigt Daten von kleinen, vermutlich heterogenen Kohorten mit widersprüchlichen Ergebnissen. Es gibt wenige Studien über die Sprachproduktion von Kohorten mit einer zweistelligen Anzahl an Teilnehmern. Größere Studien widmen sich insbesondere Kindern und Jugendlichen, wie die Studie von Uchanski & Geers von 2003, die 103 Teilnehmer einschließt (15). Die Sprachproduktion von adulten CI-Nutzern wird noch vernachlässigt. In Anbetracht der verfügbaren Studienlage zeigt sich, dass die Kapazitäten eines Implantats nicht

schlüssig die Fähigkeit zur Sprachproduktion vorhersagen. Studien mit größeren Kohorten sind notwendig, um Aspekte zu identifizieren, die Vorhersagen über die Sprachproduktion bei CI-Nutzern treffen können. Diese sind wichtig, um eine geeignete Rehabilitation nach Implantation zu gewährleisten.

Vor allem ist die Sprachverständlichkeit von adulten CI-Nutzern selten von wissenschaftlichem Interesse. Sie ist eine Hauptfunktion der Sprache. Im Gegensatz zum Sprachverstehen bedeutet sie, wie gut ein Sprecher von einem anderen verstanden wird.

Eines der seltenen Werke über die Sprachverständlichkeit aus dem Jahr 2001 zeigte, dass eine verlängerte CI-Tragedauer die Sprachverständlichkeit von postlingual ertaubten Patienten verbesserten. Es wurden lediglich 11 Probanden untersucht, wobei wiederholt neben der Verbesserung der Sprachverständlichkeit auch eine hohe Variabilität zwischen den einzelnen Probanden auffiel (16). Zudem fielen Veränderungen der Artikulation, Formantstruktur der Vokale, Nasalität, Stimme und Prosodie nach Implantation auf (17; 13; 18). Sprachliche Besonderheiten von CI-Trägern wurden denen von Hörgeräteträgern mit ausgeprägter Schwerhörigkeit gegenübergestellt. Hierfür wurden 10 CI-Träger mit 10 hörgerätversorgten Probanden und 10 normalhörenden Patienten verglichen. Zu den Sprachaspekten zählten Formanten, die stimmhaften und stimmlosen Anteile bei Wörtern, die Stimmqualität, die Stimmeinsätze und die Aussprachequalität. Es zeigte sich, dass CI-Träger schlechtere Ergebnisse als Normalhörende, aber bessere Ergebnisse als Hörgerätversorgte aufwiesen (19).

Eine Münchner Studie betrachtete verschiedene Einflussgrößen auf die Artikulation von Formanten: Neumeyer et al. (2010) erkannte bei einigen CI-Nutzern Unterschiede in den Formantfrequenzen von Vokalen und den Vokalräumen. Auf diese Weise wurden Rückschlüsse über die Historie der Ertaubung geschlossen, vor allem ob eine Ertaubung prälingual (vor abgeschlossenem Spracherwerb) oder postlingual (nach abgeschlossenem Spracherwerb) in Erscheinung trat und wie lange es bis zur Implantation dauerte (18). In Folge dessen wird erwartet, dass die Dauer zwischen der Ertaubung bis zur Implantation und der Zeitpunkt der Ertaubung einen Einfluss auf die Verständlichkeit nehmen werden.

Das Sprachverstehen wird durch die Dauer der Ertaubung beeinflusst: In einer multizentrischen Studie wurden Einflussparameter auf die Sprachperzeption beschrieben. Lazards et al. (2012) untersuchten den Einfluss von 15 prä-, peri- und postoperativen Faktoren auf die Sprachperzeption von 2.251 postlingual ertaubten adulten CI-Nutzern. Sie fanden folgende Faktoren

mit signifikantem Einfluss auf die Sprachperzeption: die Hörschwelle vor der Implantation, die Anzahl und Anordnung der aktiven Elektroden, die Dauer der Ertaubung bis zur Implantation und die frühe Versorgung mit Hörgeräten (20).

Demzufolge sind Daten für die Qualität der Sprachproduktion und -Verständlichkeit bei CI-Nutzern selten. Dies liegt vorrangig an den bisherigen Methoden zur Sprachbewertung, welche besonders zeit- und personalaufwändig sind. Bislang werden unterschiedliche Methoden für die Evaluation der Sprachverständlichkeit angewendet (21), die auf einer perzeptiven Bewertung basieren, z. B. mithilfe von Likert Skalen oder einer prozentualen Berechnung von korrekt verstandenen Wörtern eines Sprachkorpuses (22). Dabei bewertet ein Panel von Hörern mit vergleichbarem Hintergrund (erfahren oder unerfahren), wie gut sie verstanden haben oder das transkribieren, was sie gehört haben. Letzteres ist die exaktere Methode, bedarf aber einem hohen Aufwand, um daraus einen verlässlichen Wert zu bilden. In einem Münchner System werden für diese Aufgabe Studenten akquiriert. Um zu gewährleisten, dass es sich in jedem Fall um unerfahrene Hörer handelt, müssen permanent unerfahrene Studenten mit dieser Bewertungsmethode betraut werden. Außerdem müssen ständig neue – aber vergleichbare – Wörter ausgewählt werden. Diese Methode ist zwar sehr verlässlich, aber für den breiten Einsatz an einem großen Kollektiv kaum geeignet.

In den letzten Jahren wurde eine neue und objektive Methode der Evaluation mit einem automatischen Spracherkennungssystem (ASR) etabliert (23), welche die oben beschriebene Methodik aufgreift. Im Gegensatz dazu erfolgt dies jedoch mittels stochastischer Analyse der zeitlichen und spektralen Eigenschaften gesprochener Sprache. Der Quotient der automatisch erkannten korrekt ausgesprochenen Wörter (WR, engl. „word recognition“) entspricht dabei der perzeptuell bewerteten Sprachverständlichkeit und wird als „Grad der Verständlichkeit“ bezeichnet. Es bewertet die Sprachverständlichkeit eines standardisierten Sprachkorpuses. Die Bewertung weist eine perfekt reproduzierbare Beständigkeit der Ergebnisse mit Korrelationen jeweils über 0,85 auf (24; 25).

1.2 Ziele der Studie und Ausblick für weitere Studien

Ziel dieser Studie ist es, verschiedene Einflussfaktoren auf die allgemeine Sprachverständlichkeit, in diesem Fall den Grad der Verständlichkeit, von CI-Nutzern zu identifizieren.

Die Erkenntnisse aus dieser Studie dienen der Verbesserung der Sprachrehabilitation nach der CI-Versorgung.

Bei den CI-Nutzern, die das CI mindestens 6 Monate nutzen, werden folgende anamnestisch erhebbare Parameter betrachtet:

- den Beginn der Ertaubung (prä- und postlingual),
- die Dauer der Ertaubung bis zur Implantation,
- die uni- und bilaterale CI-Versorgung und die bimodale Versorgung mit Hörgeräten.

Aufgrund der erhobenen Parameter soll eine für den Kliniker unkompliziert reproduzierbare Gruppeneinteilung etabliert werden. In weiteren Doktorarbeiten werden diese Gruppeneinteilung und die erzeugten retrospektiven experimentell klinisch erhobenen Daten dieser Pilotstudie für weitere Untersuchungen genutzt. In naher Zukunft soll die Rehabilitation einzelner Aspekte der Sprachverständlichkeit, wie z. B. die Intonation oder die Nasalität nach CI-Versorgung, untersucht werden.

Zur Objektivierung der Ergebnisse dieser Studie wird das bereits erprobte automatische Spracherkennungssystem (ASR, engl. „Automatic Speech Recognition“) anstelle einer subjektiven Sprachbewertung genutzt.

2. Hintergrund

2.1 Das Ohr und seine physikalischen Hintergründe

Das Ohr ermöglicht zwei Sinneswahrnehmungen: das Hören und den Gleichgewichts-/ Lagesinn. Mithilfe des menschlichen Gehörs ist ein Hörbereich von 16 Hz bis 20.000 Hz mit einem Hauptsprachfeld von 250 Hz bis 4.000 Hz (in Abbildung 1 als hellgrüner Graph dargestellt) wahrnehmbar. Alle Frequenzen unterhalb des o. g. Hörbereichs werden als Infraschall und alle Frequenzen darüber als Ultraschall bezeichnet. Diese sind für das menschliche Gehör üblicherweise nicht mehr wahrnehmbar.

Um Klänge eines Musikinstruments oder Geräusche in der Natur entschlüsseln zu können, werden diese mittels Fourier-Analyse in Töne zerlegt. Ein Ton ist definiert als reine Sinusschwingung mit einer speziellen Frequenz. Wohingegen ein Klang ein Frequenzgemisch aus einem Grundton und periodenförmigen harmonischen Schwingungen darstellt. Ein Geräusch setzt sich aus einem gänzlich ungeordnetem Frequenzgemisch zusammen (26).

Die Frequenzen der Umgebung werden durch den Schalldruck, den Druck den die Schallwellen auf die Fläche des Trommelfells ausüben, an das Gehör übertragen. Der Schalldruck wird üblicherweise in der SI-Einheit Pascal (Pa) bzw. in $\frac{N}{m^2}$ angegeben. Der geringste Schalldruck, der über die Frequenzen eine Hörwahrnehmung erzeugt, wird als Hörschwelle (gelber Graph in Abbildung 1) definiert. Bei Schwerhörigen verschiebt sich die Hörschwelle (z. B. blauer Graph in Abbildung 1). Der Schalldruck wird der Einfachheit halber als Schalldruckpegel (SPL) umgerechnet und in Dezibel (dB) angegeben:

$$SPL \text{ (Sound Pressure Level)} = 20 \cdot \log\left(\frac{\text{Schalldruck}}{\text{Referenzschalldruck}}\right) = 20 \cdot \log\left(\frac{P}{P_{ref}}\right)$$

Daraus resultiert: Eine Verzehnfachung des Schalldruckes erhöht den Schalldruckpegel um 20 dB (27).

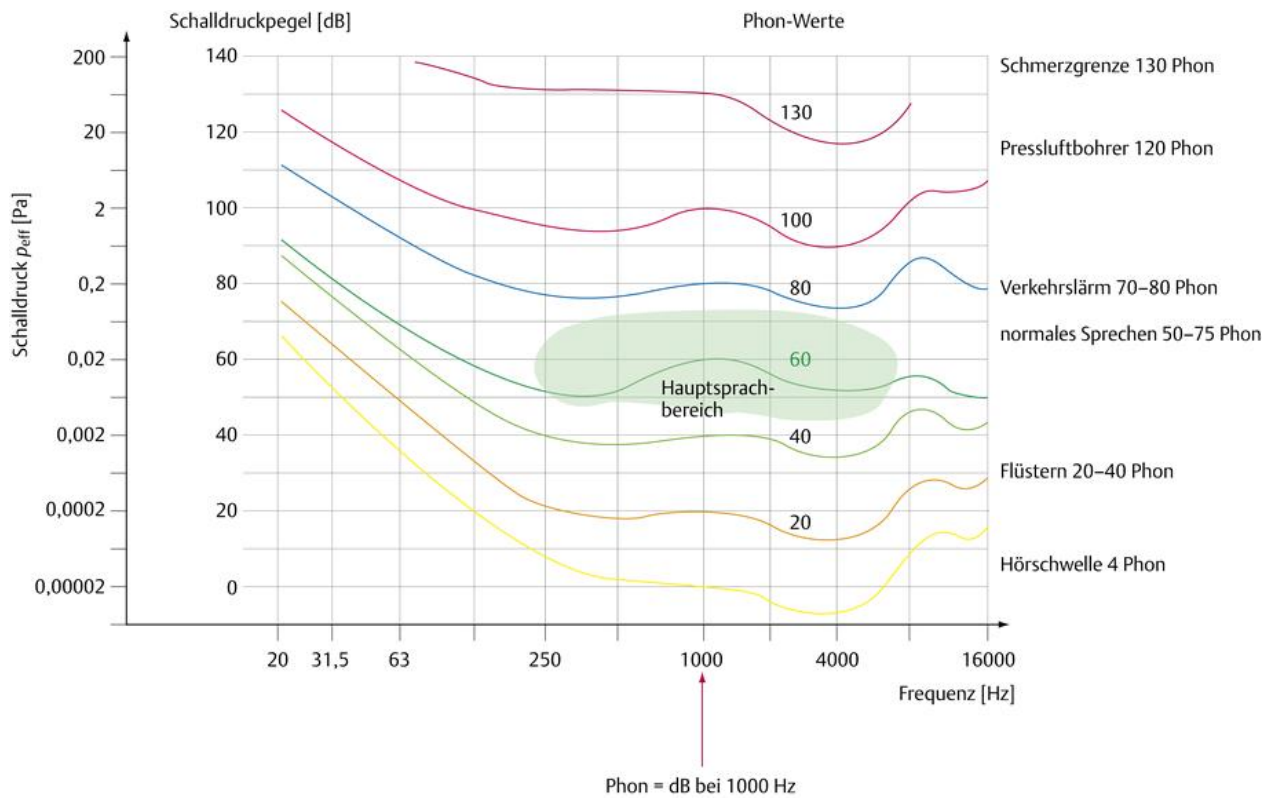


Abbildung 1: Darstellung der Hörschwelle und Isophone (28)

Der Schalldruckpegel spiegelt allerdings nicht die subjektive Lautstärkeempfindung wieder. Ausschließlich bei 1.000 Hz ist der Schalldruckpegel gleich der Lautstärkeempfindung in Phon. Die Empfindung der Lautstärke ist frequenzspezifisch. Werden alle gleich laut empfundenen Frequenzen verbunden ergeben sich Isophone (die farbigen Graphen in der oberen Abbildung), Bei 4 Phon wird statistisch die Hörschwelle ermittelt, Flüstern liegt bei etwa 20 Phon bis 40 Phon, Sprechen bei 50 Phon bis 75 Phon, die Schmerzgrenze beträgt circa 130 Phon (27).

2.1.1 Anatomie (Äußeres Ohr, Mittelohr, Innenohr)

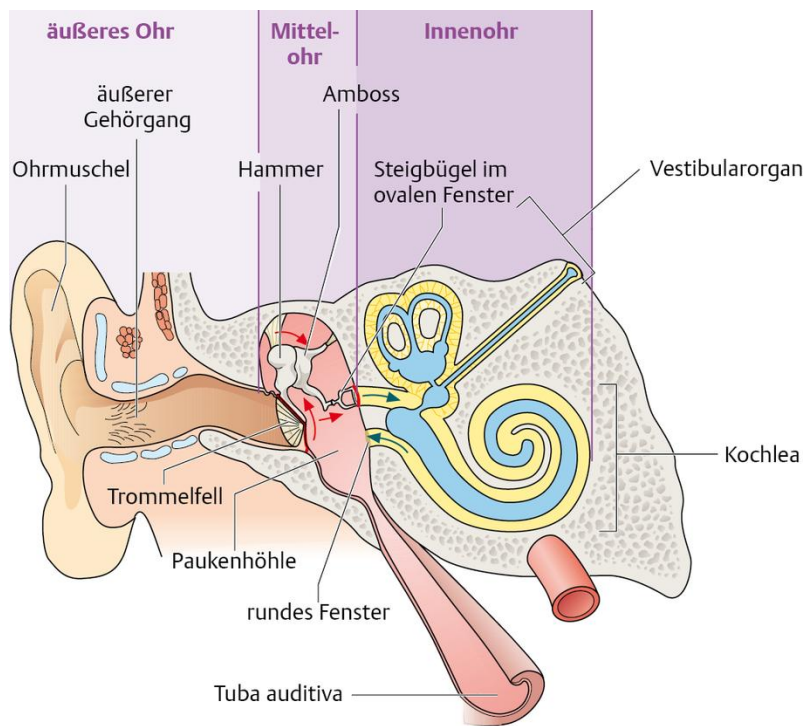


Abbildung 2: Ohranatomie (29)

Das äußere Ohr (Auris externa) wird von der Ohrmuschel, dem äußeren Gehörgang und dem Trommelfell gebildet. Die Funktion ist das Richtungshören und die Schallübertragung an das Mittelohr.

Das Mittelohr (Auris media) grenzt an das Trommelfell an. Es wird aus den drei Gehörknöchelchen: Hammer (Malleus), Amboss (Incus) und Steigbügel (Stapes) in der Paukenhöhle, bestehend aus Epi-, Meso- und Hypotympanon, sowie der Tuba auditiva und dem Antrum mastoideum mit den Mastoidzellen gebildet. Das Mittelohr grenzt an das ovale Fenster des Innenohrs. Die Funktion ist die Transduktion der mechanischen Schallwellen durch Scherbewegung der Gehörknöchelchen auf das Medium Wasser des Innenohrs (30). Da am ovalen Fenster die Impedanz (der Schallwellenwiderstand) zunimmt, muss eine Impedanzanpassung erfolgen. Geschieht dies nicht, werden 99 % der Schallwellen reflektiert. Die Impedanzanpassung gelingt durch die Kraftübertragung auf eine kleinere Fläche, und zwar von 90 mm² des Trommelfells auf 3 mm² des ovalen Fensters. So reflektieren nur noch 35 % der Schallwellen. Bei Schalldruckpegeln von über 80 dB ist eine Schallreflexion gewünscht, um das Innenohr nicht zu schädigen. Der Musculus stapedius zieht am Stapes und der Musculus tensor tympani am Malleus, so wird die Impedanzanpassung unterbrochen (27).

Das Innenohr (Auris interna) besteht aus der Cochlea und dem Gleichgewichtsorgan (mit Utriculus, Sacculus und den drei Bogengängen). Die Cochlea besitzt zweieinhalb Windungen und wird aufgrund ihres schneckenartigen Gehäuses auch als Hörschnecke bezeichnet. Die Cochlea ist häutig ausgekleidet und in drei Räume unterteilt: Die Scala vestibuli, Scala media und Scala tympani (31). Die Scala vestibuli und die Scala tympani sind mit Perilymphe, einer der Extrazellulärraum ähnelnden Flüssigkeit, gefüllt. Sie kommunizieren über das Helicotrema miteinander. Die Scala media ist mit kaliumreicher Endolymphe gefüllt und geht am Ductus reuniens in die Bogengänge über. Die Scala media wird durch die Reissner-Membran von der Scala vestibuli und durch die Basilarmembran von der Scala tympani getrennt. In ihr befindet sich das Corti-Organ. Es trägt die sensibel innervierten inneren und die efferent innervierten äußeren Haarzellen als Sinneszellen (27).

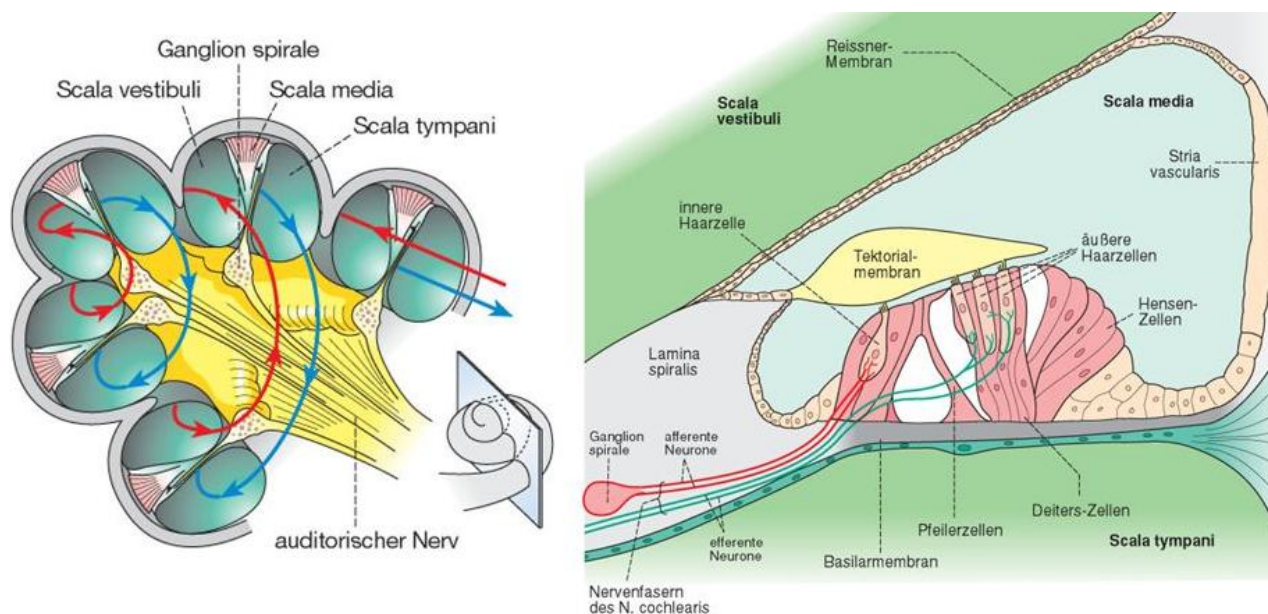


Abbildung 3: Schalltransduktion im Innenohr (32)

2.1.2 Hörphysiologie (Corti-Organ)

Tonotopie

Sobald eine bestimmte Frequenz mit ihrem Schalldruck das ovale Fenster und somit die Scala vestibuli und über das Helicotrema die Scala tympani erreicht, wird die Basilarmembran ausgelenkt. Die Auslenkung bewegt sich als sogenannte Wanderwelle bis zur Apex. Die Basilarmembran ist an der Basis steifer als an der Apex, da sie zur Apex hin dünner und länger wird. Durch den Steifigkeitsunterschied werden hohe Frequenzen an der Basis und tiefe an der Apex wahrgenommen. Am Ort der maximalen Auslenkung der Basilarmembran beginnt die

Verstärkerfunktion des Innenohrs. Die äußeren Haarzellen können aufgrund des Proteins Pektin kontrahieren und somit die maximale Auslenkung unterstützen. Nach der maximalen Auslenkung wird die Wanderwelle deutlich abgeschwächt. Der Ort, an dem die maximale Auslenkung erreicht wird, ist demnach frequenzspezifisch. Dies wird als Tonotopie bezeichnet (27; 33).

Elektrophysiologie

Am Ort der Auslenkung bewegt die Tektorialmembran die Stereozilien der äußeren Haarzellen. Sobald die Bewegung in Richtung der längeren Stereozilien ablenkt (exzitatorische Bewegung), dehnen sich die tip-links zwischen den Stereozilien. Die Transduktionskanäle für Kalium öffnen sich. Aufgrund des Konzentrationsunterschiedes (+ 80 mV bis + 100 mV Scala media und - 50 mV bis - 70 mV Membranpotential der Haarzellen) strömt Kalium in die Sinneszellen ein. Obwohl die afferenten inneren Haarzellen die Tektorialmembran nicht berühren, werden sie mit ausgelenkt. Wird ein Aktionspotential erreicht, innerviert jede innere Haarzelle eine einzige Nervenfasern. Dadurch bleibt die Tonotopie gewahrt. Der Schalldruck wird hingegen über 20 bis 30 Nervenfasern verschlüsselt. Die Tonotopie besteht auch auf neurologischer Ebene weiter (27).

2.1.3 Die zentrale Hörbahn

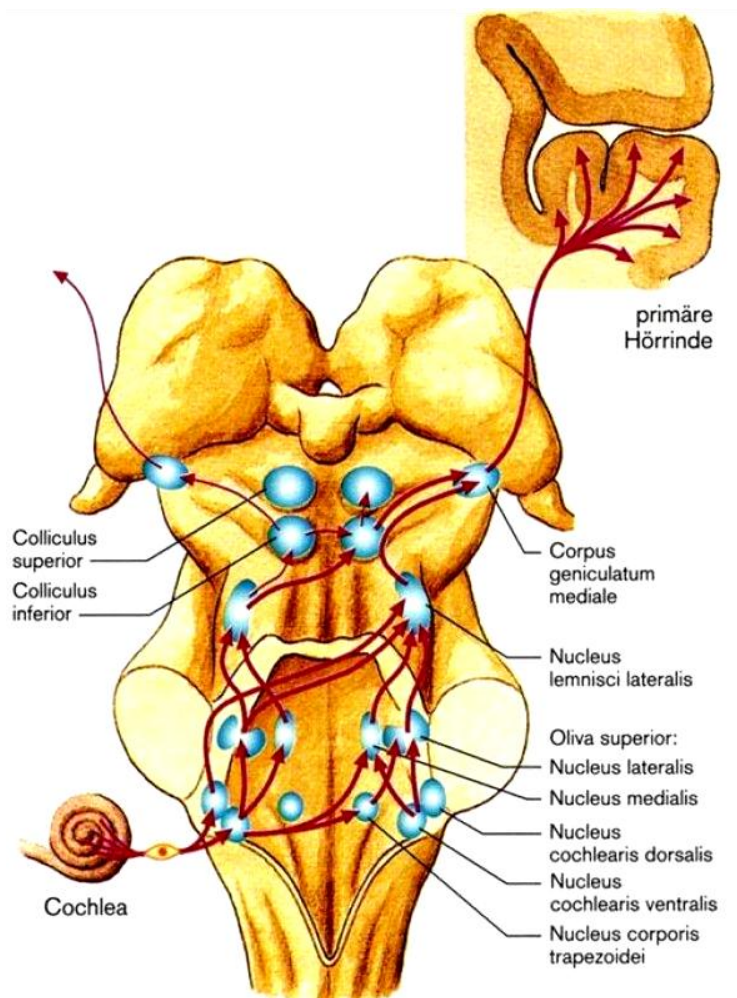


Abbildung 4: Die Hörbahn (34)

Die tonotopische Reizweiterleitung wird auf neuronaler Ebene bis zur primären Hörrinde (dem auditorischen Cortex) fortgesetzt. Die Nervenfasern geben ihre bioelektrische Information über das Ganglion spirale über den Nucleus cochlearis ventralis und dorsalis im Hirnstamm weiter. Hier beginnt die erste Projektion auf die kontralaterale Gehirnhälfte. Dies dient der Wahrnehmung der Schallrichtung. Die bioelektrische Information erreicht die superiore Olive mit dem Nucleus lateralis und medialis. In der medialen superioren Olive wird die Schallquelle durch Laufzeitunterschiede identifiziert. Die laterale superiore Olive identifiziert die Schallrichtung durch Schallintensitätsunterschiede. Über den Lemniscus lateralis wird kontralaterale Information des Nucleus cochlearis dorsalis in den Nucleus lemnisci lateralis eingeschleust. Von hier erfolgt die Weitergabe der bioelektrischen Information ipsi- oder kontralateral in den Colliculus inferior und über Corpus geniculatum mediale in die Brodmann- Areale 41 und 42 des primären auditorischen Cortex (27; 35).

2.1.4 Hörstörungen und ihre Einteilung

Unter der Schwerhörigkeit, Hypakusis, wird die Verminderung der Hörfähigkeit verstanden. Die Schwerhörigkeit zählt nach der „Burden of Disease“-Studie der World Health Organization (WHO) zu den sechst häufigsten Erkrankungen in den Industrieländern. Die Prävalenz der behandlungsbedürftigen Hörstörungen liegt in Deutschland bei circa 19 % (36).

Schwerhörigkeit (Hypakusis)

Die Hypakusis kann laut WHO nach dem Grad ihrer Ausprägung („Grades of hearing impairment“) wie folgt eingeteilt werden:

Grad 0	Normakusis	25 dB oder besser
Grad 1	geringgradiger Hörverlust	26 dB - 40 dB
Grad 2	moderater/ mittelgradiger Hörverlust	41 dB - 60 dB
Grad 3	hochgradiger Hörverlust	61 dB - 80 dB
Grad 4	Hörreste oder Gehörlosigkeit	> 81 dB oder mehr

Tabelle 1: WHO-Einteilung nach Grad der Schwerhörigkeit

Im 1. Grad wird Flüsterversprache, Sprache in der Entfernung oder Sprache mit Störgeräuschen schwer verstanden. Bereits im 2. Grad wird Sprache schwer verstanden. Patienten mit einer Schwerhörigkeit 3. Grades verstehen keine Sprache mehr und nehmen lediglich sehr laute Geräusche wahr. Im 4. Grad werden Sprache und laute Geräusche nicht mehr verstanden, aber gegebenenfalls noch als Vibrationen wahrgenommen (37). Schwerhörigkeit wird des Weiteren in Schallleitungsschwerhörigkeit, Schallempfindungsschwerhörigkeit und kombinierte Schwerhörigkeit mit einer Kombination aus Schallleitungs- und Schallempfindungsschwerhörigkeit eingeteilt (35).

2.1.5 Prävalenz und Ursachen für Hörstörungen

Laut dem Deutschen Schwerhörigenbund e.V. (Bundesweiter Selbsthilfeverband schwerhöriger und ertaubter Menschen) sind circa 19 % der über 14-jährigen in Deutschland schwerhörig. Darunter sind 56,5 % leichtgradig schwerhörig, 35,2 % mittelgradig schwerhörig, 7,2 % hochgradig schwerhörig und 1,6 % an Taubheit grenzend schwerhörig. Der relative Anteil der Hörgeschädigten nimmt im Alter zu. Bei den 14- bis 19-jährigen sind es ca. 1 % und bei den über 70-jährigen in etwa 54 %. Dies geschieht bei einem Bevölkerungszuwachs in Höhe von 0,3 % im Jahr 2005 auf 0,1 % im Jahr 2011 (38).

Die WHO ermittelte, dass ungefähr 5 % der Weltbevölkerung einen Hörverlust von über 40 dB im Erwachsenenalter und von über 30 % im Kindesalter aufweisen. Von 360 Millionen Menschen gelten 328 Millionen (91 %) der Betroffenen als erwachsen. Von den 32 Millionen (9 %) betroffenen Kindern könnten 60 % der Ursachen für eine Schwerhörigkeit bereits durch Prävention und Neugeborenen screenings verhindert werden (39). Trotz der immensen Zahl an betroffenen Erwachsenen wird das Hauptaugenmerk bei der Bewertung sprachlicher Fähigkeiten nach einer Cochlea Implantation bisher immer noch auf Kinder gelegt.

Als Ursachen für Schwerhörigkeit wird am häufigsten die idiopathische Schwerhörigkeit genannt. Ein vergleichbar geringerer Anteil gilt als erworben oder hereditär. Zur ideopathischen Schwerhörigkeit führen beispielsweise Hörstürze. Toxische Schäden, Immunerkrankungen oder Infektionen können als erworben gelten. Die hereditäre Schwerhörigkeit ist zu 30 % syndromal. Derzeit sind 312 Syndrome bekannt, die mit Hörverschlechterung vergesellschaftet sind (35).

2.1.6 Cochlea Implantat

Indikationen

Cochlea Implantate finden Verwendung bei hochgradiger oder kompletter peripherer Schallempfindungsstörung, wenn Sprache mit Hörgeräten nicht mehr hinreichend verstanden wird. Im Gegensatz zu Mittelohrimplantaten können CI bei Schädigung der Haarzellen in der Cochlea verwendet werden (40). Es bedarf jedoch einem intakten retrocochleären Hörnerv und einer regelrechten Hörbahn. Insofern aber ein beidseitiger funktionsloser Hörnerv vorliegt (z. B. durch bilaterale Akustikusneurinome, Neurofibromatose Typ II mit bilateralen Akustikusneurinomen, traumatische Hörnervschädigung, postmeningitischer Ertaubung mit Obliteration oder Aplasie des Hörnervs), kann ein zentral-auditorisches Implantat (Hirnstammimplantat oder ABI (engl. „auditory brainstem implant“) implantiert werden. Vor Implantation eines CI erfolgen Voruntersuchungen zur Sicherstellung eines funktionstüchtigen Hörnervs und der regelrechten Hörbahn.

Es gibt keine Altersbeschränkung für eine Implantation. Es werden sowohl prälinguale gehörlose Kinder und Erwachsene, perilingual (während des Spracherwerbs) gehörlose und resthörige Kinder, sowie postlingual gehörlose und resthörige Kinder, Jugendliche und Erwachsene mit einem CI versorgt. Bei der prälingualen und perilingualen kindlichen Hörstörung wird ausdrücklich eine rasche Implantation empfohlen (41).

Bei bilateraler Indikation ist eine bilaterale Implantation möglich. Bei stabiler Resthörigkeit können Implantatsysteme für Elektrisch-Akustische Stimulationen, eine Kombination aus CI für hohe Frequenzen an der Basis der Cochlea und Hörgeräte für die tiefen erhaltenen Frequenzen der apexnahen Cochlea, genutzt werden (40).

Kontraindikationen

Zu den absoluten Kontraindikationen zählen dementsprechend: eine fehlende Cochlea oder eine Hörnervaplasie, eine Funktionsstörung der zentralen Hörbahn, jedoch auch eine fehlende Rehabilitationsfähigkeit des Patienten und eine nicht sichergestellte postoperative Rehabilitation.

Relative Kontraindikationen stellen eine therapieresistente Epilepsie, Komorbiditäten, eine Otitis media acuta oder ein negativer subjektiver Promontoriumstest dar (41).

Voruntersuchungen

Zu den Voruntersuchungen zählen: die Ohrmikroskopie, der HNO-Status, der Allgemeinzustand, Ton- und Sprachaudiometrie, Hörgeräteoptimierung im Vorfeld und Überprüfung dessen im freien Schallfeld, Impfungen nach STIKKO, logopädische und weitere Konsultationen zur Abklärung von Komorbiditäten.

Es erfolgen objektive Tests wie TEOAE/ DPOAE, Calorische Prüfungen, Felsenbein-CT und MRT mit Abbildung des Schläfenbeins und des Kleinhirnbrückenwinkels, Impedanzaudiometrie, BERA, optional: Promontoriumstest, Elektrocochleographie.

Bei Kindern können die Voruntersuchungen durch Entwicklungsdiagnostiken und entwicklungsdiagnostische Untersuchungen zum Ausschluss einer Retardierung, sowie psychosoziale Diagnostiken ergänzt werden.

Die Implantation eines CI erfolgt in hochspezialisierten Cochlea-Implant-Zentren, die die oben genannten Voruntersuchungen, die routinierte Operation und die interdisziplinäre Rehabilitation gewährleisten können (41).

Funktionsweise

Wie bereits in der Einleitung erklärt, erfolgt eine rein elektrische Informationsübertragung. Zunächst wird die Frequenz der Sprache über ein Mikrofon im Sprachprozessor [1] aufgenommen und als elektrisches Pulsmuster in der Sendespule [2], ein Bestandteil des Sprachprozessors, kodiert. Dieses Pulsmuster wird dann in dem subkutan gelegenen Implantat [3] enkodiert. Die Spule wird mittels eines Magneten auf der Haut über dem Implantat gehalten. Dies ermöglicht das Abnehmen des Sprachprozessors beispielsweise beim Schwimmen oder Schlafen. Das Implantat reicht die entschlüsselten elektrischen Reize über einen Elektrodenträger [4] in das runde Fenster in die Scala tympani (siehe Abbildung 5 rechts unten) der Cochlea weiter. Hier kann je nach Ort und Stärke der elektrischen Reizung eine tonotopie Auflösung der auditiven Reize erfolgen (40).

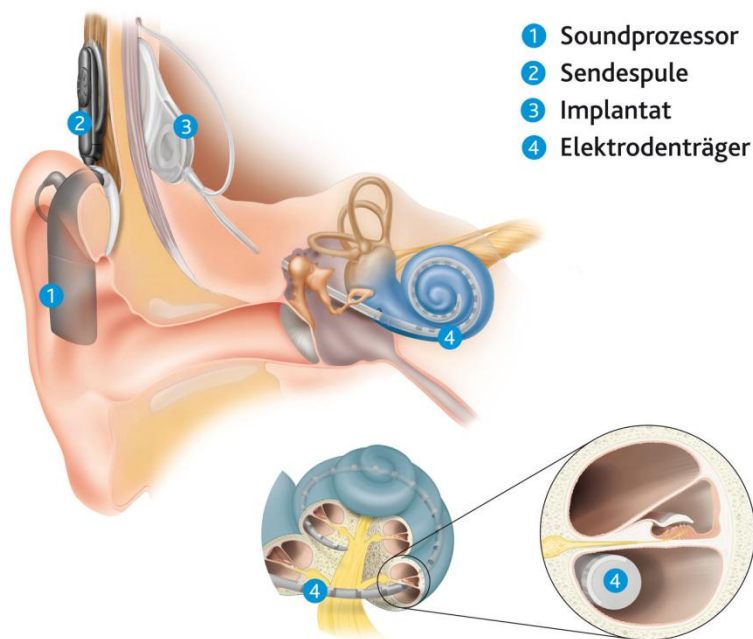


Abbildung 5: Aufbau eines Cochlea Implantats (42)

Operative Implantation

Die operative Implantation erfolgt in Allgemeinanästhesie. Zunächst erfolgt eine retroaurikuläre Eröffnung und Präparation eines circa 0,5 cm dicken Hautlappens. Danach wird der Musculus temporalis vom Mastoid geschoben, sodass nach Einschleifen des Prozessorbettes die Mastoidektomie erfolgen kann. Über die sogenannte „Soft-Surgery-technique“ wird der Chorda-Fazialis-Winkel über eine posteriore Tympanotomie eröffnet. Nach Darstellung der anato-

mischen Strukturen erfolgt die Cochleostomie mit einem Bohrer zwischen dem Amboss-Steigbügel-Gelenk und dem runden Fenster. Anschließend kann die Elektrode eingebracht werden und der Wundverschluss erfolgen. Die Operationstechnik kann sich je nach CI-Zentrum und anatomischen Verhältnissen unterscheiden (43; 44).

Komplikationen

Zu den möglichen Komplikationen zählen: Wundheilungsstörungen und Infektionen, Tinnitus aurium, Vertigo, Fazialisparese, Geschmacksstörungen, unerwünschte Stimulationen, Verlust des Restgehörs, Elektodenfehlanlage, Unverträglichkeiten der Implantatmaterialien, Liquorfisteln und Meningitis.

Rehabilitation

Die Rehabilitation erfolgt meist in CI-Zentren. Hierbei werden Hör-, Sprech- und Sprachleistungen kontrolliert. Es erfolgen Prozessoranpassungen durch Techniker/ Audiologen, Hör- und Sprachtraining durch Logopäden/ Sprachpädagogen/ Gehörlosenpädagogen, Kontrolluntersuchungen durch HNO-Ärzte und ggf. psychologische Betreuung durch Psychologen. Im ersten Jahr werden Untersuchungen alle 3 Monate, im 2. Jahr alle 6 Monate und ab dem 3. Jahr jährlich empfohlen (41).

2.2 Sprache

2.2.1 Sprache und Ihre Funktionsweise

Sprache dient uns zur Kommunikation und somit zur Übermittlung und dem Austausch von Informationen. Sie kann in verschiedenen Sprachformen vorkommen, so existiert neben der oralen Sprache die Gebärdensprache und die alphabetisch-graphische Sprache.

Als Sprache gilt dasjenige Medium, das alle der folgenden vier Sprachbestandteile aufweist: Inhalte (Semantische Omnipotenz, Lexikon und Produktivität), Anordnung (Grammatik und syntaktische Komplexität), Träger (Biplanarität, Arbitrarität und Doppelartikulation, Diskretheit) und Umstände (Pragmatik). Fehlt eines der genannten Sprachbestandteile, wird die Kommunikationsform nicht als vollwertige Sprache anerkannt.

Die Sprachbestandteile werden in linguistischen Spracheigenschaften und linguistischen Ebenen umgesetzt.

Spracheigenschaften

Semantische Omnipotenz (Inhalte): Sie beschreibt die Möglichkeit alles Erdenkliche auszudrücken.

Produktivität (Inhalte): Sie beschreibt die Fähigkeit Sprache in Untereinheiten bzw. Modulen zu ordnen und unterschiedlich zu kombinieren. So entsteht das Lexikon.

Syntaktische Komplexität (Anordnung): Sie beschreibt die Möglichkeit einen Sachverhalt durch verschiedene Kombinationen von Zeichen oder Formulierungen wiederzugeben.

Biplanarität, Arbitrarität und Doppelartikulation (Träger): Die Biplanarität und Arbitrarität meinen die unterschiedliche Beschaffenheit eines Wortes durch dessen Inhalt (Signifikat) und dessen Form (Signifikant). Die Doppelartikulation gibt die erste und zweite Artikulationsebene an. Die erste Artikulationsebene wird durch Morpheme (z. B. „Kinder“) als kleinste bedeutungsvermittelnde Ebene vermittelt. Die zweite Artikulationsebene beinhaltet Phoneme ohne eigene Bedeutung, die Signifikaten untereinander unterscheiden und damit als distinktiv gelten (z. B. „tot“ oder „rot“).

Diskretheit (Träger): Der Träger (das Phonem) ist diskret. Darunter wird verstanden, dass Phoneme nach dem „alles oder nichts Prinzip“ ohne Überlappungen funktionieren. Es wird „Rat“ oder „Rot“ verstanden. Es gibt nichts dazwischen (45).

Linguistische Ebenen der Sprache

Graphemische Ebene: Sie definiert mit Ihren Graphemen das Alphabet einer Sprache und ist spezifisch für eine Sprache.

Phonemische Ebene/ phonologisch-phonetische Ebene: Sie beschreibt die Phoneme bzw. Laute als kleinstes distinktives Merkmal eines Wortes. Als Allophone gelten Varianten der Laute/ Phoneme wie z. B. bei Dialekten. Die Phoneme zählen mit suprasegmentalen Strukturen wie Betonungen oder Akzenten zum phonologischen Niveau. Des Weiteren wird das phonetische Niveau in artikulatorische/ genetische Phonetik und akustische/ gennematische Phonetik unterschieden.

Morphologische Ebene: Hierunter werden die Morpheme als kleinste bedeutungsunterscheidende Einheit betrachtet. Sie gelten als Stamm-, Prä- oder Suffixe.

Syntaktische Ebene: Sie beschreibt mit den Regeln der jeweiligen Sprache wie Satz- oder Wortteile zu Wörtern oder Sätzen zusammengeführt werden.

Semantische Ebene: Diese gibt den Sinn eines Textes an.

Pragmatische Ebene: Sie stellt den Bezug eines Wortes oder Satzes zu einer Person, der Zeit, dem Ort oder einem Vorgang dar (46; 45).

2.2.2 Sprachentwicklung

Die Sprachentwicklung findet in mehreren Phasen statt. Zunächst beginnt in den ersten 6 bis 8 Wochen das Reflexschreien. Mit der ersten Lallphase werden die ersten Lautbildungen im 3. bis zum 5. Lebensmonat geübt. In der zweiten Phase des Lallens, bis zum 12. Lebensmonat, wird die Melodie und die Phonembildung durch Mimikri und Wiederholungen erlernt (35). Hierbei spielt der Input durch auditorisches Feedback eine große Rolle (47). Hörstörungen können daher bereits in dieser frühen Phase bemerkt werden. Im 2. Lebensjahr werden Einzelwörter erlernt und erste Zweiwortäußerungen gebildet. Bis zum 4. oder spätestens 6. Lebensjahr ist das Erlernen der Kerngrammatik und der Lautbildung abgeschlossen. Ist der Spracherwerb bis zum 4. Lebensjahr aufgrund einer ausgeprägten Hypakusis beeinträchtigt, sprechen wir von prälingualer Gehörlosigkeit. In der anschließenden sekundären Phase der verbalen Sprachentwicklung wird lediglich die Kerngrammatik bis zum 12. bzw. 14. Lebensjahr erweitert (45). Tritt die Hypakusis in der sekundären Phase der verbalen Sprachentwicklung auf, wird dies als perilinguale Gehörlosigkeit bezeichnet.

2.2.3 Sprachzentren – Sprachperzeption bis Sprachproduktion

Die Sprachperzeption findet über Verschaltungen des primären auditorischen Cortex (Brodmann-Areal 41 und 42) zum sensorischen Sprachzentrum (Brodmann-Areal 22) im Schläfenbein links statt. Dieses sensorische Sprachzentrum (Wernicke-Region) kann neben dem Sprachverstehen auch über Verbindungen zum visuellen Assoziationscortex (Areal 17 und Areal 18) Gegenständen Begriffe zuordnen.

Wird beispielsweise ein Gegenstand benannt oder auf etwas Verstandenes geantwortet, so beginnt das motorische Sprachzentrum (Brocca-Region) in den Brodmann-Arealen 44 und 45 mit der Koordination des Sprechapparates und der Atmung (31).

2.2.4 Der Sprechapparat

Als Sprechapparat werden die menschlichen anatomischen Strukturen bezeichnet, die an der Schall- und Klangproduktion/ Artikulation teilnehmen. Hierzu gehören die Lunge, die Trachea, der Larynx mit den beiden Stimmlippen, der Gaumen, das Zäpfchen, die Zunge und die Zähne. Die supraglottischen Hohlräume, der Oro- und Nasopharynx und die Mundhöhle, werden hierbei als Ansatzrohr oder Vokaltrakt bezeichnet (46).

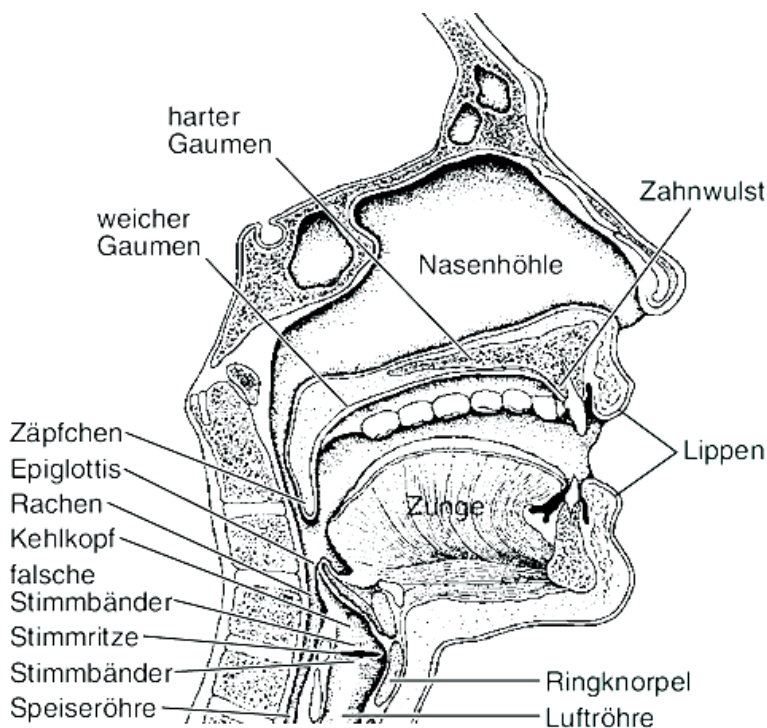


Abbildung 6: Der Sprechapparat (48)

2.2.5 Schallproduktion

Zur Schallproduktion wird Luft bei der Expiration mit erhöhtem subglottischen Druck durch die geschlossene Stimmlippenebene gepresst. Hierdurch geraten die Stimmlippen in Schwingung, und der erzeugte Luftstrom wird periodisch unterbrochen. Es entsteht ein akustisches Signal, die Schwingfrequenz der Stimmlippen. Dieses periodische Schwingen wird vereinfacht als eine Grundfrequenz (F_0) gehört. Die Grundfrequenz der Stimmlippen beträgt bei Männern 100 Hz bis 150 Hz und bei Frauen 180 Hz bis 250 Hz. Die Schwingfrequenz kann sich beim Sprechen und

Singen durch die Kontraktion der Musculi vocales und der äußeren Stimmlippenspanner (Mm. cricothyroidei) in verschiedenen Oktaven bewegen, die Gesamtheit dessen wird als Klangfarbe einer Stimme bzw. als Stimme bezeichnet. Die Stimmlippen schwingen nach der myoelastischen-aerodynamischen Theorie periodisch, wenn der subglottische Druck im Gleichgewicht zu den myoelastischen Kräften des Kehlkopfs steht (46; 45; 27).

2.2.6 Klangproduktion/ Artikulation

Die Artikulation meint die Änderung des Schalls bzw. des Luftstroms im Vokaltrakt durch Bewegungsvorgänge der Artikulatoren (z. B. Gaumen, Zäpfchen, Zunge und Zähne). Hierdurch können Laute gebildet werden. Die erzeugten Laute werden in Vokale und Konsonanten unterschieden.

Vokale und Formanten

Die Vokale werden primär durch das ungehinderte Strömen der Luft bzw. des Schalls durch den in seinem Durchmesser gering veränderlichen Vokaltrakt gebildet. Dadurch werden diverse Frequenzen verstärkt, es bilden sich Resonanzfrequenzen. Wenn diese durch die Artikulatoren (Kieferöffnung, Zunge und Lippen) modifiziert werden, entstehen Vokale (49).

Die Vokalbildung entsteht durch das Zusammenspiel von Zungenhöhe bei Veränderung der Mundöffnung (der erste Formant F1) und der Zungenposition nach vorn oder hinten (zweiter Formant F2). Im folgenden Vokalviereck lässt sich die Ausformung von Vokalen im Mundraum darstellen. Die Lippen befinden sich links und der Zungengrund rechts in der Abbildung (45).

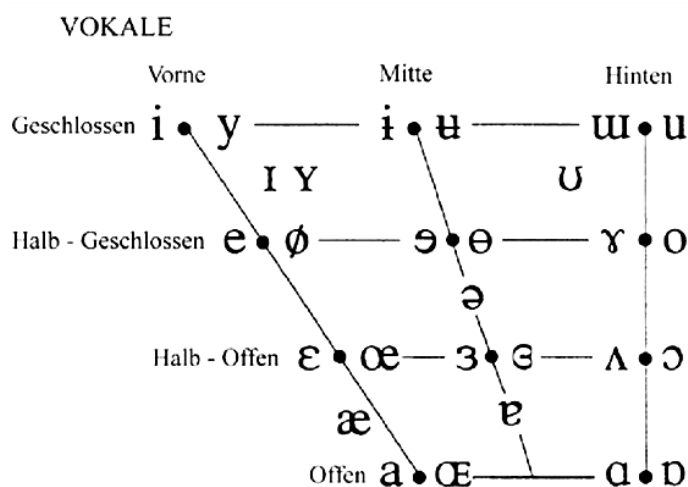


Abbildung 7: Das deutsche Vokalviereck (50)

Konsonanten

Konsonanten entstehen im Gegensatz zu Vokalen durch das Auftreten von Engstellen im Vokaltrakt. Der Luftstrom bzw. der Schall wird an der Engstelle gestoppt und reflektiert. Die Konsonantenbildung wird durch das Zusammenspiel von Artikulationsort/ -stelle und -art erzeugt, wie in der nachfolgenden Tabelle verdeutlicht (46).

Artikulationsart	Artikulationsstelle			
	labial	dental	palatal	velar
plosiv				
stimmlos	p (parc)	t (table)		k (carte)
stimmhaft	b (bar)	d (dame)		g (gare)
frikativ				
stimmlos	f (foi)	s (six)	ʃ (champ)	
stimmhaft	v (voir)	z (zoo)	ʒ (joie)	ʁ (rare)
nasal	m (mort)	n (nord)	ɲ (ligne)	
lateral		l (lait)		
Approximanten	w (oie) ɥ (huit)		j (taille)	

Tabelle 2: Die Konsonanten des Deutschen und Französischen (51)

Durch die Artikulationsart ist zu entnehmen wie die Luftströmung durch die Engstellen gehindert wird: Ist die Engstelle okklusiv, resultieren plosive und nasale Laute. Eine okklusive Engstelle wird als Übergangserscheinung (Transient) vor oder nach einem Vokal erzeugt. Die labialen Konsonanten sind dabei abfallend (Minus-Transient), die dentalen Konsonanten sind ansteigend (Plus-Transient) und die velaren Konsonanten sind gleichbleibend (horizontaler Transient). Bei konstriktiver Engstelle werden überwiegend die Frikativen und Approximanten erzeugt. Ist die Engstelle lateral konstriktiv, mit Öffnung des Mundes nach lateral, werden die lateralen Konsonanten erzeugt (45).

2.2.7 DIVA-Theorie

Ein entscheidender Aspekt der Sprachverständlichkeit ist die Artikulation. Präzise Artikulationen beruhen auf präzisen akustischen Rückkopplungen. Entsprechend der „Directions Into Velocities of Articulators“-Theorie (52) werden alle Laute einer Sprache in einer „speech sound map“ im linken Operculum frontale dargestellt. Während des Sprechens wird diese „speech sound map“ ständig mit einer „auditory state map“ und einer „somatosensory state map“ verglichen. Abweichungen von der „speech sound map“ werden ständig in akustischen oder somato-

sensorischen „error maps“ registriert, um die Artikulationspräzision und die Geschwindigkeit einzustellen. Dies wird in folgender Abbildung veranschaulicht:

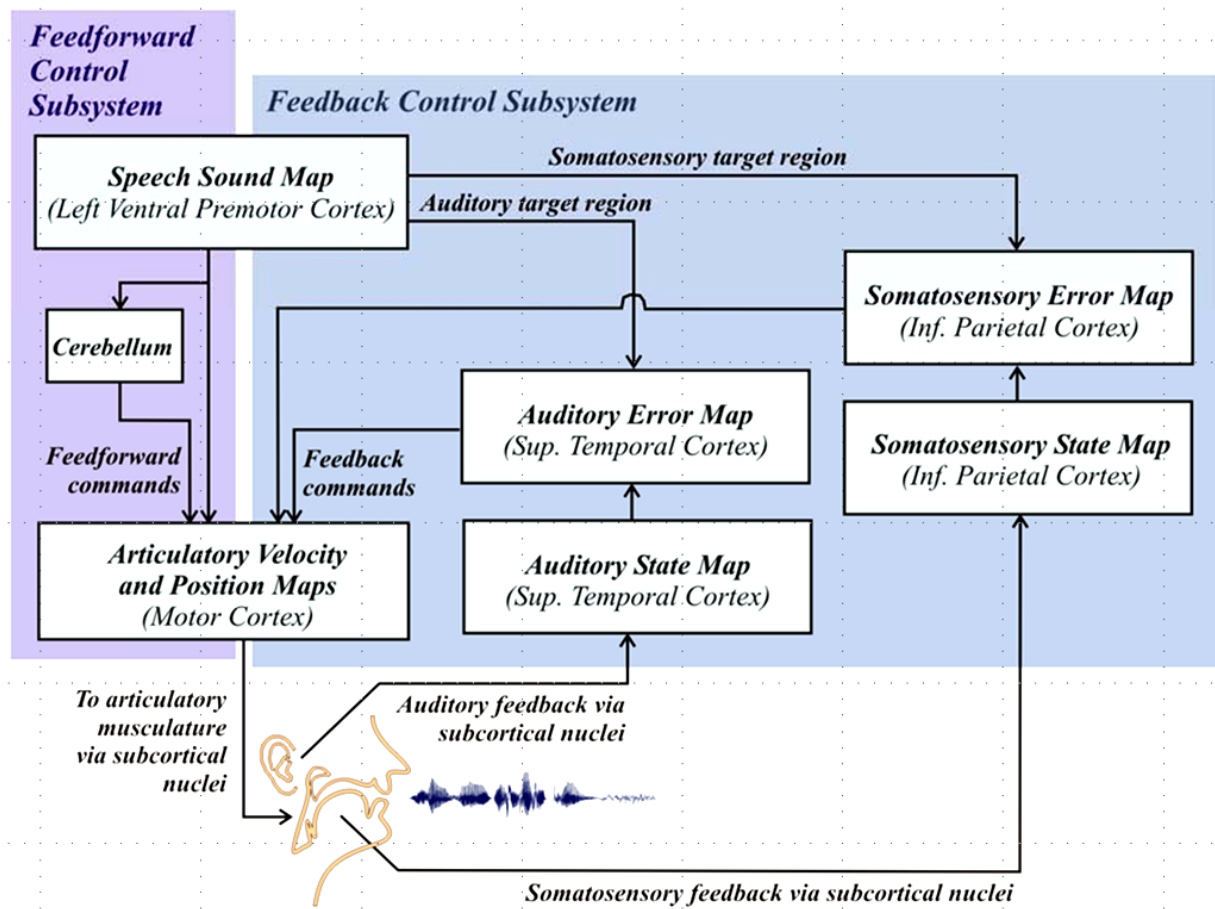


Abbildung 8: Das DIVA-Modell (52)

Im Falle einer prä- oder perilingualen Gehörlosigkeit ist die „speech sound map“ aufgrund unzureichender auditiver Wahrnehmung eingeschränkt. Eine korrekte Einstellung der Artikulation ist somit nicht möglich. Auch postlinguale Gehörlosigkeit könnte zu Änderungen in diesen „Karten“ führen, vor allem aber hinsichtlich der „auditory state map“. Ohne funktionierende auditive Rückkopplung gibt es keinen Vergleich zwischen der „speech sound map“, der „auditory state map“ und den „error maps“, die zu veränderter Artikulation führen (53). Der DIVA-Theorie zufolge wird das Ausbleiben von auditorischem Feedback die Sprache des Betroffenen in einem kurzen Zeitraum nur in geringem Ausmaß beeinträchtigen, weil das „feedforward control subsystem“ noch gut abgestimmt ist. Wenn jedoch der Hörverlust über einen langen Zeitraum anhält, wird sich der Befehl zur Vorwärtskopplung langsam verschlechtern. Studien wiesen nach, dass normalhörende Individuen einen Kompromiss zwischen auditorischer Klarheit und minimalem Sprechaufwand eingehen (54; 13). Folglich

könnten ertaubte Personen ihre Artikulationsanstrengungen verringern, wenn das auditive Feedback fehlt oder eingeschränkt ist. Die Artikulation wird zusätzlich eingeschränkt, wenn die Gehörlosigkeit früh im Leben auftritt, bevor der Vokaltrakt wie bei einem Erwachsenen ausgereift ist (13). Die sensorische und motorische Zustandskarte sind möglicherweise noch nicht auf die Dimensionen des Vokaltrakts eines Erwachsenen ausgelegt.

Nach der Cochlea-Implantation steht die „auditory state map“ wieder für die Anpassung der Artikulation zur Verfügung. Es besteht jedoch noch eine veränderte auditorische Rückkopplung, welche die Gehörlosigkeit noch nicht vollständig kompensiert hat. Bei lang anhaltenden Hörverlusten kann die Artikulation wegen Veränderungen der „speech sound map“ nicht komplett wiederhergestellt werden.

2.2.8 Informationstheorie nach Shannon

Eine Information, so z. B. das Auftreten eines Phonems, ist die Wahrscheinlichkeit, mit der ein Zustand stattfindet („1“) oder nicht stattfindet („0“). Je weniger der Zustand des Auftretens vorhersagbar ist, desto höher ist der Informationsgehalt. Ein Satz ist daher für die Ermittlung eines Phonems weniger informativ und weniger präzise als die Ermittlung eines einzigen Wortes. Die Informationstheorie nach Shannon beschäftigt sich vor allem mit Systemen, in denen parallel Zustände auftreten können („1“) oder nicht auftreten („0“). Phoneme werden durch parallel angebotene spezifische Sprachmerkmale (sog. „cues“) wie z. B. stimmhaft oder nicht stimmhaft als das Phonem A oder das Phonem B erkannt. Auf diese Weise gelingt die Phonemerkennung des Gehörs und eines CIs, sowie die Spracherkennung (45).

3. Material und Methoden

3.1 Untersuchungskollektiv – CI-Träger und Kontrollgruppe

In diese Studie wurden CI-Nutzer ab dem 16. Lebensjahr während ihrer regelmäßigen ambulanten Behandlung eingeschlossen. Die deutsche Sprache ist ihre Muttersprache. Alle Teilnehmer wurden unilateral oder bilateral mit Cochlea Implantaten verschiedener Hersteller versorgt. Bei unilateraler Versorgung war eine bimodale Versorgung mit einem Hörgerät möglich. Nachdem die Probanden ihre schriftliche und mündliche Zustimmung für die Teilnahme an der Studie erteilt hatten, beantworteten alle einen standardisierten anamnestischen Fragebogen über ihren Hörverlust. Anschließend erfolgte eine standardisierte Sprachaufzeichnung. Hierfür verfügten die CI-Nutzer über ausreichende Seh- und Lesefähigkeiten, um das korrekte Ablesen vom Computermonitor zu gewährleisten.

In der Kontrollgruppe sind erwachsene Probanden ohne anamnestischen Hörverlust eingeschlossen. Es handelt sich um Patienten, die wegen anderer Erkrankungen als Hör- und Sprachschäden in derselben Abteilung behandelt wurden. Jedem CI-Nutzer ist ein gleichaltriger Kontrollgruppensprecher zugeordnet. Dieser verfügte ebenfalls über hinreichende Seh- und Lesefähigkeiten.

Die Studie wurde von dem örtlichen Ethikkomitee genehmigt. Für die CI-Nutzer folgte das Implantationsverfahren einschließlich der Chirurgie, der Implantation und der Rehabilitation einem standardisierten Protokoll, d. h. 4 bis 6 Wochen nach der Cochlea-Implantation wird der Sprachprozessor aktiviert. Die Anpassung erfolgt an zwei aufeinander folgenden Tagen. Nach 4 Wochen findet die nächste Sitzung zur Anpassung in einem eintägigen Hörtraining statt. Regelmäßige Termine sind 3, 6 und 12 Monate nach der Operation geplant. Diese Sitzungen werden jeweils von einem Hörtraining begleitet. Danach werden regelmäßige Kontrollen mindestens einmal jährlich durchgeführt. Die Studienteilnehmer sind mindestens seit 6 Monaten mit einem CI versorgt.

3.2 Gruppen

Die CI-Nutzer sind hinsichtlich des Beginns der Gehörlosigkeit und nach Dauer der Gehörlosigkeit vor der Implantation in 3 Gruppen unterteilt:

Gruppe A: prä- und perilinguale Ertaubung und Spätversorgung. Hierbei wird die Spätversorgung definiert als Sprache, die mehr als 2 Jahre lang nicht mehr suffizient mit Hörgeräten verstanden werden kann, bevor die CI-Versorgung erfolgt.

Gruppe B: postlinguale Ertaubung und Frühversorgung. Hierbei wird die Frühversorgung definiert als Verlust des Sprachverstehens auch mit Hörgeräten weniger als zwei Jahre, bevor die CI-Versorgung erfolgt.

Gruppe C: postlinguale Ertaubung und Spätversorgung. Hierbei wird die Spätversorgung definiert als Verlust des Sprachverstehens länger als 2 Jahre bevor die CI-Versorgung erfolgt.

Eine Gruppe mit prälingualer Ertaubung und Frühversorgung konnte aus Mangel an Probanden nicht gebildet werden. Dies liegt daran, dass noch bis vor wenigen Jahren keine Frühversorgung gehörlos geborener Kinder erfolgte.

	prä-/ perilinguale Ertaubung		postlinguale Ertaubung	
Intervall zwischen Ertaubung und Cochlea Implantation	< 2 Jahre	> 2 Jahre	< 2 Jahre	> 2 Jahre
n	0	14	15	21
Gruppe		A	B	C

Tabelle 3: Gruppenaufteilung der 50 CI-Nutzer

3.3 Sprachkorpus

Für die Evaluation der Sprachproduktion wurde von jedem Probanden ein standardisierter Sprachtest mit 97 einzelnen deutschen Wörtern gesprochen. Dieser ist abgeleitet von dem standardisierten Test zur Bewertung phonologisch-phonetischer Störungen PLAKSS (Psycholinguistische Analyse kindlicher Sprechstörungen) und beinhaltet alle deutschen Phoneme in verschiedenen Positionen innerhalb der Wörter.

Die vorzulesenden Wörter wurden auf einem Computermonitor präsentiert. Das Sprechen der Studienteilnehmer wurde mit einem headset-montierten Mikrofon (Beyerdynamic Microphone Opus 54.15-3) aufgezeichnet. Dabei wurde ein Programm zur Sprachaufzeichnung vom Institut für Phonetik und Sprachverarbeitung von der Universität München mit einer Abtastfrequenz von 22.050 Hz verwendet.

Die Aufnahmen wurden in einem schallabsorbierenden Raum mit geringem Nachhall durchgeführt, der üblicherweise für audiologische Untersuchungen verwendet wird. Die Aufnahmequalität wurde während der Aufnahmen von der Studienleiterin gesteuert. Wenn beim Vorlesen Lesefehler auftraten, wurden die Probanden um eine Wiederholung gebeten. Auf einer graphischen Darstellung der Sprachenergie wurde die Aussteuerung kontrolliert und gegebenenfalls angepasst.

3.4 ASR-System

Zur Sprachauswertung wurde das automatische Spracherkennungssystem herangezogen, das am Institut für Mustererkennung an der Universität Erlangen-Nürnberg entwickelt wurde. Die Software wurde über ein Client-Server-Netzwerk auf gängigen Computern verwendet; die Analyse erfolgte anonymisiert. Der automatisierte Spracherkenner basiert auf halbkontinuierlichen „hidden Markov“-Modellen mit Polyphonen, einer hierarchischen Darstellung von allophonen Unterworteinheiten. Das Polyphon-Konzept verallgemeinert die Biphon- oder Triphon-Idee mit einem (theoretisch) beliebig großen phonetischen Kontext (55). Als akustischer Eingang wurden sog. „Mel Frequency Cepstrum Koeffizienten“ (MFCCs) verwendet. Hierbei handelt es sich um eine gebräuchliche technische Analyse für Spracherkennungssysteme basierend auf einer Mel-Skala zur Frequenzbestimmung von Tönen (46). MFCCs nutzen ein sich alle 10 ms überlappendes Analysefenster (Verschiebung des Analysefensters) mit einer Länge von 16 ms, die Sprachsignale werden demnach kontinuierlich überlappend analysiert. Der Merkmalsvektor besteht aus der Kurzzeit-Energie und 11 Mel-Frequenz-Cepstral-Koeffizienten. Zusätzlich wurde die parametrische Darstellung durch 12 Delta-Koeffizienten (zeitliche Ableitungen) angereichert, die als Anstieg der Regression von fünf aufeinanderfolgenden kleinen Zeiteinheiten berechnet wurden.

Es wurde ein unigrammes Sprachmodell genutzt, um das Ergebnis jedes Wortmodells abzuwägen (56). Unigram bedeutet, dass die Häufigkeit des Auftretens eines Phonems eines jeden Wortes

dem Erkennen ohne kontextuelle Information „bekannt“ war, und dass dabei keine Wortfolge einbezogen wird. Laut der Informationstheorie nach Shannon kann von einem präziseren und informativeren Ergebnis als bei biphonen und triphonen (höherwertigen n-Grammen) Sprachmodellen ausgegangen werden. Demzufolge werden weder die Reihenfolge der Wörter noch syntaktische Informationen in die Auswertung mit einbezogen, da nur einzelne Wörter gelesen wurden.

Das System wurde mit allen deutschen Dialekten abgedeckt und somit von Dialekten unabhängig gestaltet. Das Training des Spracherkennungssystems erfolgte durch ein großes Kollektiv an normalhörenden Sprechern aus ganz Deutschland. Alle Sprecher wurden gebeten, verständlich zu sprechen. Neunzig Prozent der Sprachtrainingspopulation (304 Männer, 274 Frauen) waren jünger als 40 Jahre alt. Aus dem Projekt VERBMOBIL des Lehrstuhls für Mustererkennung der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg wurden so insgesamt 27 Stunden Sprachaufzeichnungen (bestehend aus 11.714 Äußerungen und 257.810 Wörtern) zum Trainieren des Systems verwendet. Das Vokabular des Erkennungssystems wurde durch die 97 Wörter des angewandten Sprachtests vertreten.

Für die Auswertung des Grades an Sprachverständlichkeit eines Studienteilnehmers wurde die Worterkennungsrate (WR) berechnet. Die WR ist der Prozentsatz korrekt erkannter Wörter der gesprochenen 97 Wörter.

In früheren Sprachauswertungen wurden für die WR sehr hohe Übereinstimmungen mit der perzeptuell ausgewerteten Verständlichkeit eines erfahrenen Zuhörergremiums bezüglich satz-basierender, wortbasierender und transkriptioneller Phoneme beschrieben (57; 58; 59; 25).

3.5 Statistik

Wir verglichen die WR zwischen den 3 Gruppen, sowie jede Gruppe mit ihrer altersangepassten Kontrollgruppe. Der Vergleich der WR zwischen den 3 Gruppen erfolgte mit einem Kruskal-Wallis-Test unter Verwendung eines Signifikanzniveaus von 5 %. Wenn der Kruskal-Wallis-Test signifikant war, wurden paarweise Mann-Whitney-U-Tests mit dem gleichen Signifikanzniveau von 5 % durchgeführt, ohne dass eine weitere Anpassung für mehrfache Tests aufgrund eines geschlossenen Testverfahrens erforderlich war. Für jede Gruppe wurde der Vergleich des WR mit der jeweiligen Kontrollgruppe separat unter Verwendung eines Mann-Whitney-U-Tests mit

einem Signifikanzniveau von 5 % durchgeführt. Hier wurde keine Anpassung für mehrfache Tests durchgeführt, da diese Analysen zur Betrachtung unterschiedlicher Forschungsfragen herangezogen wurden.

Außerdem wurde die mögliche Korrelation von Alter, Geschlecht, Alter bei Ertaubung und Dauer des Hörverlustes und Dauer der Hörgerätversorgung auf die WR analysiert. Für Gruppenvergleiche wurden Mann-Whitney-U-Tests berechnet, die Korrelationsanalyse wurde unter Verwendung der Spearmans Rangkorrelation durchgeführt.

Diese Korrelationsanalysen wurden sowohl für die gesamte CI-Anwendergruppe als auch gesondert für die Gruppen der CI-Nutzer mit postlingualem Hörverlust (Gruppe B und C) und für CI-Nutzer mit langer Hörverlust (Gruppe A und C) durchgeführt.

Nicht-parametrische Methoden wurden verwendet, da die WR nicht normalverteilt ist. Statistische Analysen wurden mit Excel 12.3.2 und SPSS Statistics 21 durchgeführt.

4. Ergebnisse

4.1 Studienteilnehmer und Kontrollgruppen

An der Studie waren insgesamt 100 Erwachsene beteiligt. 50 von 100 Probanden hatten mehr als hochgradige Hörverluste und waren CI-Nutzer seit mindestens 6 Monaten. Die Gruppe der CI-Nutzer bestand aus 33 Frauen und 17 Männern im Alter von $48,6 \pm 20,0$ Jahren mit uni- oder bilateraler Cochlea Implantat-Versorgung. Alle Probanden, auch der Kontrollgruppen, waren deutsche Muttersprachler. Die CI-Nutzer trugen Implantate verschiedener Generationen und verschiedener Hersteller. Die Daten der CI-Nutzer, einschließlich Alter, Geschlecht, ihrer Geschichte des Hörens, CI-Nutzung und Dauer der Hörgerätenutzung vor der Implantation, sind in der folgenden Tabelle zusammengefasst:

Gruppe Mittelwert \pm Standardabweichung median; min.; max.	A	B	C
n	14	15	21
weiblich / männlich	11 / 3	11 / 4	11 / 10
Alter (Jahre)	$37,4 \pm 17,9$ 33; 18; 71	$53,3 \pm 18,4$ 60; 17; 78	$59,1 \pm 14,7$ 55; 38; 82
Alter bei Beginn des Hörverlustes (Jahre)	$1,8 \pm 2,5$ 0; 0; 4	$32,6 \pm 17,9$ 38; 7; 60	$25,6 \pm 18,3$ 25; 4; 65
Alter bei Beginn der Ertaubung (Jahre)	$18,7 \pm 21,7$ 25; 0; 65	$45,2 \pm 22,9$ 59; 15; 77	$46,1 \pm 22,7$ 46; 14; 77
Dauer der Hörgerätenutzng (Jahre)	$29,4 \pm 17,7$ 29; 1; 67	$20,0 \pm 16,1$ 21; 0; 29	$21,6 \pm 11,5$ 19; 5; 41
Dauer der CI-Nutzung (Jahre)	$7,1 \pm 6,1$	$6,0 \pm 5,2$	$5,3 \pm 5,9$
	5; 0,5; 19	4; 1; 17	4; 0,5; 18
unilaterale / bilaterale CI-Versorgung	10 / 4	9 / 6	15 / 6
bimodal: CI- und Hörgerät-Versorgung	3	4	8

Tabelle 4: Daten der Cochlea Implantat-Nutzer-Gruppen

Gruppe A, B und C wurden nach dem Beginn und der Dauer der Ertaubung, dem Beginn des Hörverlustes und der Dauer der Hörgerätversorgung befragt. Bitte beachten Sie, dass der Unterschied zwischen dem Alter beim Hörverlust, der Dauer der Hörgerätversorgung und dem Alter bei Ertaubung nicht präzise der Gruppenklassifizierung entspricht. Dies liegt daran, dass einige CI-Nutzer immer noch ein Hörgerät an einem Ohr verwenden.

50 Probanden mit Normakusis und ohne Sprechstörungen wurden als Kontrollgruppe aufgenommen. Für Vergleichszwecke wurden sie altersabhängig der CI-Nutzer-Gruppe gegenübergestellt:

Die Kontrollgruppe A bestand aus 14 Probanden im Alter von $39,6 \pm 9,0$ Jahren, die Kontrollgruppe B aus 15 Probanden im Alter von $55,9 \pm 17,8$ Jahren und die Kontrollgruppe C aus 21 Probanden im Alter von $53,1 \pm 14,6$ Jahre. Sie nutzten ihre normale Hörleistung, d. h. ohne Hilfestellung, beim Durchlaufen des Testverfahrens.

4.2 WR und beeinflussende Faktoren

Die Korrelationsanalyse über Einflüsse auf die WR in der Kohorte von 50 CI-Nutzern ist in der nachfolgenden Tabelle zusammengefasst:

Gruppe	Alter	Geschlecht	Alter bei Ertaubung	Dauer der Ertaubung	Dauer der CI-Nutzung	Dauer der Hörgeräte-Versorgung	Anzahl der CI	Bimodale Nutzung
	*	+	*	*	*	*	+	+
Rho; Alle	-0,04		0,27	-0,386	0,07	-0,23		
p; n = 50	0,72	0,35	0,06	0,006	0,629	0,13	0,93	0,19
Rho; A u. C	0,14		0,21	-0,24	0,02	-0,29		
p; n = 35	0,44	0,71	0,22	0,17	0,92	0,11	0,25	0,25
Rho; B u. C	-0,06		0,067	-0,395	0,12	-0,02		
p; n = 36	0,72	0,28	0,7	0,017	0,47	0,91	0,86	0,14

Tabelle 5: Korrelationsanalyse zwischen WR und den Merkmalen der Probanden

Der p-Wert der Spearmans Rangkorrelation (Rho) ist mit einem „*“ und der p-Wert des Mann-Whitney-U-Tests mit einem „+“ gekennzeichnet. Signifikante Werte sind durch fette Zahlen gekennzeichnet. Die Gruppe A besteht aus prälingual Ertaubten CI-Nutzern mit langer Dauer der Gehörlosigkeit vor der CI-Versorgung, Gruppe B aus postlingual Ertaubten mit einer kurzen Dauer und Gruppe C aus postlingual Ertaubten mit einer langen Dauer der Gehörlosigkeit vor der CI-Versorgung. Zum Gruppenvergleich wurden die Gruppen mit postlingualer Ertaubung (B und C) und mit langer Dauer der Surditas bis zur CI-Versorgung (A und C) zusammengefasst, um jeweils diesen Einfluss besser darzustellen.

Das Alter sowie das Geschlecht der Probanden zeigten keinen signifikanten Einfluss auf die WR. Die WR hat eine signifikante Beziehung zur Dauer der Ertaubung in Jahren für alle Patienten und für CI-Nutzer mit postlingualer Ertaubung.

4.3 Gruppenvergleich

Der Median für die Worterkennungsrate WR für alle CI-Nutzer lag bei 69 % (29 % - 82 %). Der Kruskal-Wallis-Test zeigt signifikante Unterschiede der WR zwischen den 3 Gruppen A, B und C hinsichtlich des Beginns der Ertaubung ($p = 0,026$) und der Dauer der Ertaubung ($p = 0,004$).

Die WR zeigte eine hohe Variation vor allem in Gruppe A und C, in denen die Probanden spät mit einem CI versorgt wurden. Der Median der WR war am höchsten in Gruppe B (74 %), deren Probanden wurden weniger als 2 Jahre nach postlingualem Hörverlust mit einem CI versorgt (siehe Tabelle 6). Die WR der Gruppe A (58 %) und C (65 %) ist jeweils signifikant unterschiedlich zur WR der Gruppe B (Mann-Whitney-U, Gruppe A gegen B: $p = 0,002$; Gruppe B gegen C: $p = 0,025$). Zwischen Gruppe A und C zeigt die WR keinen signifikanten Unterschied (Mann-Whitney-U, $p = 0,25$).

Beim Vergleich jeder Gruppe mit ihrer altersangepassten Kontrollgruppe konnten signifikante Unterschiede für die Gruppen A (56 % vs. 82 %, Mann-Whitney-U, $p < 0,001$) und C (68 % gegenüber 77 %, Mann-Whitney-U, $p = 0,001$) dargestellt werden. Gruppe B, die nach vollständigem Hörverlust zügig mit einem CI versorgt wurde, zeigte eine ähnliche WR wie ihre Kontrollgruppe (74 % vs. 75 %, Mann-Whitney-U, $p = 0,52$).

Gruppe	A	B	C
CI-Gruppe WR Mittelwert \pm Standardabweichung	57,9 \pm 15,6	73,6 \pm 5,2	65,4 \pm 12,6
Median; min.; max.	56; 29; 78	74; 59; 79	68; 40; 82
Kontrollgruppe WR Mittelwert \pm Standardabweichung	82,3 \pm 6,1	74,6 \pm 2,0	75,1 \pm 7,8
Median; min.; max.	82; 72; 82	75; 62; 83	77; 62; 90
CI- versus Kontroll-Gruppe; p	< 0,001	0,519	< 0,001

Tabelle 6: Worterkennungsrate der CI-Nutzer und der altersangepassten Kontrollgruppe

Die Korrelationsanalyse für die CI-Gruppe gegenüber der Kontrollgruppe wurde mit dem Mann-Whitney-U-Tests durchgeführt, wobei ein Signifikanzniveau von 5 % angenommen wird.

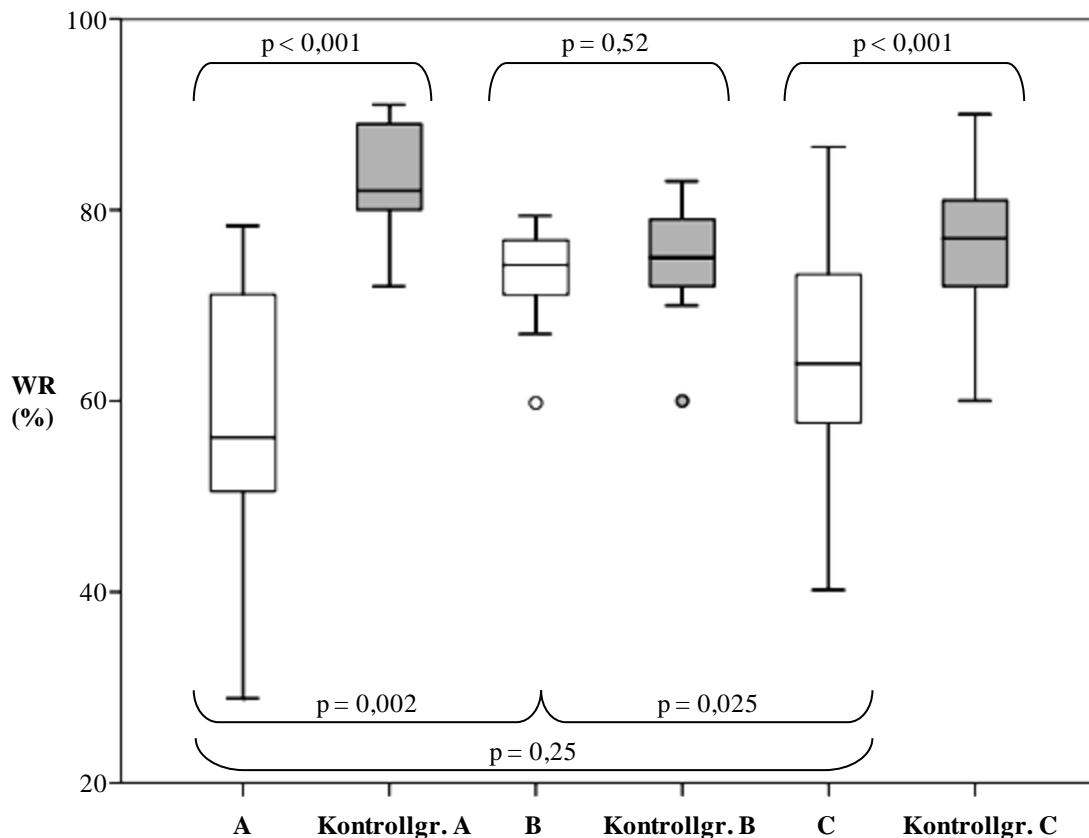


Abbildung 9: Graphische Darstellung im Boxplot der Gruppenvergleiche der CI-Nutzer

Zu sehen ist die graphische Darstellung im Boxplot der Gruppenvergleiche der CI-Nutzer (weiß) jeweils mit einer altersangepassten Kontrollgruppe (grau). Das Signifikanzniveau (Mann-Whitney-U-Test) zwischen den Gruppen der CI-Nutzer und der Kontrollgruppe ist oben in der Abbildung angegeben. Die Unterschiede zwischen den Gruppen der CI-Nutzer sind im unteren Teil der Abbildung aufgeführt. Andere möglicherweise beeinflussende Faktoren zeigten keine signifikante Beziehung zur WR (Alter bei Beginn des Hörverlustes, Dauer der CI-Nutzung, Dauer der Hörgerätnutzung, Anzahl CI, bimodale Nutzung, jeweils $p > 0,05$).

5. Diskussion

Cochlea Implantate (CI) werden weitgehend als die effizienteste technologische Ressource für die Wiederherstellung des Hörens angesehen, wenn Hörgeräte für das Sprachverstehen nicht mehr ausreichen. Bei Kindern mit angeborener Gehörlosigkeit zeigten Cosetti und Roland, dass eine frühe Cochlea Implantation zu einem normalen Spracherwerb führen kann (60). Im Allgemeinen können CIs ertaubten Kindern ein suffizientes Sprachverstehen und die Diskrimination verschiedener Phoneme ermöglichen. Nach einer anfänglichen Verzögerung kann somit eine normale Sprachentwicklung realisiert werden.

Für Erwachsene mit postlingualer Gehörlosigkeit zeigten frühere Auswertungen unterschiedliche Resultate hinsichtlich der Qualität der Sprachproduktion, so z. B. bei der spektralen Analyse von Vokalen (18). Die Literatur über weitere Sprachmerkmale zeigt auch variable Einschränkungen der Sprache von erwachsenen CI-Nutzern, ohne Einflussfaktoren auf das Sprachergebnis zu ermitteln.

In Bezug auf das Hörvermögen, insbesondere die Sprachperzeption von erwachsenen CI-Nutzern, konnten einige beeinflussende Faktoren in einer großen multizentrischen Studie identifiziert werden. Diese deuten insbesondere darauf hin, dass eine lange Zeitspanne der Ertaubung einen ungünstigen Effekt auf die Hörleistung nach der Implantation birgt (20). Die Dauer der Gehörlosigkeit könnte daher auch nach der DIVA-Theorie für das Ergebnis der Sprachproduktion von Bedeutung sein (52). Im Fokus der vorliegenden Studie über die Sprachverständlichkeit erwachsener CI-Nutzer stand hauptsächlich die Dauer und der Zeitpunkt des Auftretens der Gehörlosigkeit. Außerdem wurden weitere mögliche Einflussfaktoren betrachtet.

Dabei wurde die Sprachqualität von 50 CI-versorgten Probanden untersucht. Als Maß für die Sprachqualität wurde der Grad der Verständlichkeit herangezogen. Um den Einfluss des Beginns und die Dauer der Gehörlosigkeit auf die Sprachproduktion zu untersuchen, erfolgte eine Einteilung der Probanden in 3 Gruppen. Die kritische Dauer der Ertaubung wurde mit 2 Jahren in Anlehnung auf die Ergebnisse der Studien von Neumeyer et al. festgelegt (18). In künftigen Studien sollen mehr postlingual ertaubte Erwachsene mit CI-Versorgung integriert werden, um die kritische Dauer der Gehörlosigkeit noch genauer identifizieren zu können.

Die Charakteristika der verschiedenen Gruppen sind abhängig von der Geschichte der Cochlea Implantat-Versorgung in Deutschland. Da Cochlea Implantate erst seit den 90er Jahren des letzten Jahrhunderts vermehrt eingesetzt wurden und dies bei Kindern mit angeborener Gehörlosigkeit anfänglich zögerlich, entfällt eine Gruppe von frühimplantierten prälingual ertaubten Erwachsenen. Zum anderen ist die Anzahl und das mittlere Alter in den Gruppen unterschiedlich. Die Gruppe A beinhaltet die jüngsten Teilnehmer. In der Gruppe C, die größte Gruppe, befinden sich postlingual Ertaubte mit langer Krankheitsgeschichte (mittlerer Beginn der Schwerhörigkeit im Alter von 28 Jahren). Die große Anzahl der Probanden in Gruppe C spiegelt die derzeit noch zurückhaltende Praxis der CI-Versorgung bei ertaubten Erwachsenen wider.

5.1 Verwendung des ASR-Systems

Für die Sprachauswertung wurde das ASR zunächst unter der Verwendung eines standardisierten Textes auf die Sprache Erwachsener angepasst. Bereits in mehreren Studien hat sich das ASR als geeignete Methode für die medizinische Bewertung von Sprachqualität erwiesen (23; 61; 62; 25; 57; 58) und zeigt eine sehr hohe Übereinstimmung mit der perzeptuell beurteilten Verständlichkeit durch Sprachtherapeuten. Das Ergebnis der ASR als WR steht demnach für die Fähigkeit sich selbst verständlich zu machen. Bei der Verwendung eines unigrammen Sprachmodells, das phonetische Sprachmerkmale eines Wortes unabhängig von den darauf folgenden Wörtern hervorhebt, steht das ASR für einen standardisierten Laienhörer. Es dient somit als unterstützendes Mittel in der medizinischen Sprachbewertung.

Bisher beruhten Sprachauswertungsverfahren in medizinischen Studien in der Regel auf der perzeptuellen Beurteilung mehrerer erfahrener Zuhörer, wie z. B. Sprachtherapeuten. Zielführend sollte ein standardisierter Zuhörer konzipiert werden. Jedoch hängen die Ergebnisse stark von den Erfahrungen der einzelnen Zuhörer ab (58; 63). Perzeptuelle Sprachauswertungsverfahren könnten demnach eine eingeschränkte Reliabilität aufweisen. Darüber hinaus sind sie sehr zeitaufwendig und personalintensiv. Das Novum dieser Studie ist stattdessen die Verwendung eines objektiven Instruments, welches die schnelle Prüfung größerer Kohorten mit perfekt reproduzierbarer Vergleichbarkeit ermöglicht.

Die Ergebnisse der ASR-Beurteilung basieren hauptsächlich auf phonetischen Merkmalen, die somit niedrige Worterkennungsraten für Menschen mit veränderten Artikulationsfähigkeiten und

veränderter Resonanz zeigen. Dies konnte bereits für Kinder und Erwachsene mit Mund-Kiefer-Gaumen-Spalte oder Mundhöhlencarcinomen nachgewiesen werden (25; 58). In früheren Untersuchungen zeigte die ASR-Analyse und die perzeptiv ausgewertete Sprachverständlichkeit eine Übereinstimmung zwischen 0,84 und 0,94 unter Verwendung der Spearman Rangkorrelation. Diese Technik erlaubt auch eine detailliertere Analyse der veränderten Sprache: Zusätzlich zur Sprachverständlichkeitsbewertung kann das ASR deutliche Veränderungen der phonetischen Merkmale und der Nasalität im Vergleich zu gesunden Hörern aufzeigen (64).

5.2 Einflussfaktoren auf WR

Hinsichtlich möglicher Einflussfaktoren auf die Sprachqualität wird in dieser Arbeit der Dauer und dem Beginn der Gehörlosigkeit eine signifikante Bedeutung beigemessen. Andere Faktoren, wie das Alter zum Zeitpunkt des Hörverlustes, die Dauer der CI-Nutzung vor der Ertaubung oder die Dauer der Hörgeräteversorgung, ergaben keine signifikante Korrelation mit WR. Darüber hinaus zeigte die Anzahl der Cochlea Implantate oder die bimodale Unterstützung (CI und Hörgerät) keinen signifikanten Einfluss, obwohl der bilaterale Einsatz von CI einen positiven Einfluss auf die Sprachperzeption hat (65; 66). Obwohl mehr homogene Untergruppen auf diese Einflüsse getestet wurden (CI-Anwender selektiv mit postlingualer Gehörlosigkeit oder selektiv mit lang andauernder Ertaubung), zeigten diese Faktoren im Gegensatz zur Lazard-Untersuchung keinen signifikanten Einfluss auf die WR. Basierend auf diesen Daten werden sich zukünftige Untersuchungen auf einige weitere Merkmale, wie z. B. die Sprachperzeption und die Phonemdiskriminierung, konzentrieren.

In der vorgestellten Studiengruppe kann der Einfluss durch verschiedene chirurgische Techniken ausgeschlossen werden, da die Implantationen in den vergangenen Jahren vom gleichen Operationsteam und ohne bedeutende Fluktuationen durchgeführt wurden. In früheren Artikeln wurde jedoch besonders auf das Bewahren des niederfrequenten Restgehörs eines CI-Trägers hingewiesen (67). Andererseits kann eine tiefe Insertion ein besseres Ergebnis der Sprachwahrnehmung bei CI-Implantieren erzeugen (68). Dies gelingt ebenfalls durch unterschiedliche chirurgische Techniken der Cochleostomie (69), welche sich ständig weiterentwickeln.

5.3 WR versus Beginn und Dauer der Ertaubung

Die ASR-Ergebnisse, welche die Worterkennungsrate WR messen, zeigen eine signifikante Korrelation zum Beginn der Gehörlosigkeit (prä-/ peri- oder postlingual) und der Dauer der Gehörlosigkeit (weniger oder mehr als zwei Jahre). Dies wird in Tabelle 6 veranschaulicht.

Die WR-Werte in Gruppe B (postlinguale Gehörlosigkeit mit kurzer Dauer der Gehörlosigkeit) waren hoch und zeigten eine geringe Varianz. Scheinbar bewahrte die frühe Cochlea-Implantation nach der Ertaubung bei den meisten Patienten die normale Sprachverständlichkeit. Im Gegensatz hierzu waren die WR-Werte der Gruppen A und C signifikant niedriger als die WR ihrer jeweiligen Kontrollgruppen. Zudem zeigten die WR-Werte der Gruppen A und C eine große Varianz.

Für die Gruppe A mit prä-/ perilinguaalem Hörverlust und Spätimplantation nach über 2 Jahren Gehörlosigkeit werden aufgrund des verminderten Hörvermögens während der Sprachentwicklung lang anhaltende Effekte auf die Artikulation erwartet. Wenn die Sprachwahrnehmung vor oder während der Sprachentwicklung beeinträchtigt wird, resultiert dies in einer veränderten „speech sound map“ infolge reduzierter akustischer Informationen und durch falsche Anpassungen der „auditory state map“. In Übereinstimmung dazu fanden An et al. heraus, dass Kinder mit prälingualer Gehörlosigkeit ohne Resthörfähigkeit eine schlechtere Sprachverständlichkeit aufwiesen als Kinder mit postlingualer Gehörlosigkeit mit Resthörvermögen, die implantiert wurden, bevor die sensible Phase der Sprachentwicklung endete (70). Möglicherweise können die Probanden der Gruppe A nicht in gleicher Weise von einer CI-Implantation profitieren wie die Probanden mit postlingualer Taubheit, weil der auditorische Input in einer kritischen Phase der neuronalen Hörverknüpfung fehlte.

CIIs können zwar die neuronale Plastizität im auditiven Hirnstamm auch nach vielen Jahren der Gehörlosigkeit im Kindesalter stimulieren, jedoch sind Veränderungen im auditorischen Kortex begrenzt. Die Veränderungen, die während der Ertaubungsperiode auftraten, können zumindest zum Teil erschwert reorganisiert werden (71). Dies wird durch kürzlich durchgeführte Studien mit Positronen-Emissions-Tomographie erwiesen. Es wurden Unterschiede in den cerebralen Aktivitäten prälingual und postlingual ertaubter Erwachsener mit CI-Versorgung nachgewiesen. Dies gelang zu verschiedenen Zeitpunkten nach der Implantation. Sprech- und sprachähnliche Stimuli zeigten unterschiedlich starke Aktivierungsmuster im linken Gyrus temporalis bezüglich

der Sprachperzeption und in der Broca-Region hinsichtlich der Motorik zwischen den beiden Vergleichsgruppen (72).

Offenbar kann die Cochlea Implantation bei prälingual ertaubten Patienten frühere fehlende auditive Modulationen der verbalen Sprachfähigkeiten nicht vollständig kompensieren. Demzufolge sollte bei diesem Patientenkollektiv, insbesondere bei niedrigen WR-Werten, ein spezialisiertes und ausgedehntes Sprechtraining additional zum Hörtraining erfolgen. Die WR-Werte können von dem behandelnden Sprachtherapeuten zur Verlaufskontrolle genutzt werden.

Die mittleren WR-Werte und Standardabweichungen der Gruppe C, die Patienten mit Schwerhörigkeit nach abgeschlossener Sprachentwicklung und Spätversorgung umfasste, waren signifikant niedriger als diejenigen der Gruppe B. Die Auswirkungen des Hörverlustes auf die Sprache, wie von Leder und Spitzer beschrieben, könnten auch nach der Implantation noch bestehen (1). Da sich das Alter negativ auf die WR-Werte auswirken kann (73), und weil die Gruppen ein anderes Alter hatten, wurde der Einfluss des Alters auf die WR-Werte in der Patientengruppe getestet. Jedoch konnten keine Korrelation zwischen dem Alter und den WR-Werten gefunden werden. Auch die Dauer der CI-Anwendung nach späten Implantationen zeigte keinen signifikanten Einfluss auf dieses Kollektiv, obwohl anfänglich ein Einfluss erwartet werden konnte. Hier besteht eine Diskrepanz zu bestehenden Studien (74). Diverse Studien, wie z. B. die von Tanamati et al., zeigen nach langjährigem Verwenden eines CI Steigerungen der Sprachverständlichkeit. Hierfür wurde die Sprachverständlichkeit postlingual ertaubter Kinder, vergleichbar mit der Gruppe B dieser Studie, nach 10 jähriger Verwendung des CI betrachtet. Der Mehrzahl von 8 Kindern gelangen höchste Sprachverständlichkeitswerte. Nur 2 Kinder wiesen geringe Werte auf (75). Daraus kann gefolgert werden, dass Gruppe C ebenso hohe WR-Resultate wie Gruppe B erzielen kann, wenn das auditorische Feedback durch intensiviertes Training erhöht wird. Unsere Ergebnisse spiegeln Neumeyers spektrale Untersuchungen von Formantstrukturen von CI-Nutzern mit unterschiedlichen Hörverlustverläufen wider (18). Neumeyer beschreibt sowohl 2010 als auch 2015, dass sich die Spätversorgung mit einem CI negativ auf die Vokalräume von F1 und F2 auswirkt. Die größten Veränderungen der Vokalräume werden bei den prälingual Ertaubten mit kleineren Vokalräumen im Vergleich zur Kontrollgruppe festgestellt (18; 76). Bereits vor 2010 wurden Unterschiede für weitere Sprachmerkmale zwischen Probanden mit prä- und postlingualer Taubheit beschrieben. Gould et al. wiesen insbesondere für die Verständlichkeit der Vokale bessere Ergebnisse bei Patienten mit postlingualer Gehörlosigkeit (87 % - 99 %) als bei Probanden mit prälingualer Gehörlosigkeit

(58 % - 88 %) auf (16). Dies stimmt mit den aufgezeigten Ergebnissen der vorliegenden Arbeit überein.

Jeder Gruppe wurden Probanden derselben Altersgruppe gegenübergestellt, die nicht mit Hörgeräten versorgt waren und auch keine anderweitigen Erkrankungen des Gehörs aufwiesen. Dabei konnten keine Abhängigkeiten der WR-Werte vom Alter der Probanden in den jeweiligen drei Kontrollgruppen gefunden werden. Im Gegensatz dazu erreichten jüngere Probanden in der Kontrollgruppe höhere WR-Werte, was die Ergebnisse von Wilpon und Jacobson widerspiegelt (73). Dies erklärt, warum die Kontrollgruppensprecher aus den Gruppen B und C niedrigere WR-Werte aufwiesen, als bei einer normalen Hörpopulation zu erwarten wäre.

Nach den Ergebnissen der Gruppenvergleiche konnten signifikante Unterschiede zwischen den WR-Werten von Gruppe A und C und ihrer jeweiligen Kontrollgruppe veranschaulicht werden. Die Gruppe mit den höchsten WR-Werten (Gruppe B) zeigte keinen signifikanten Unterschied zum Ergebnis der Kontrollgruppe (73,6 % vs. 74,2 %). Somit war Gruppe B vergleichbar mit der normalen Bevölkerung desselben Alters. Dieses Ergebnis unterstreicht die Notwendigkeit einer frühzeitigen Versorgung mit einem oder zwei CIs nach komplettem Hörverlust für prä-, peri- und postlingualen Hörverlust. Somit kann eine gute Qualität der Sprachproduktion aufrecht erhalten werden oder sich dahin gehend entwickeln. Zuverlässige Daten über die Sprachverständlichkeit von erwachsenen CI-Nutzern sind wichtig, um individuelle Rehabilitationsstrategien zu entwickeln. Die gewonnenen Messdaten zeigen darüber hinaus, dass die Historie des Hörverlustes eines jeden Individuums die Sprachverständlichkeit zu einem großen Teil prägt.

6. Zusammenfassung

Eine erhöhte auditorische Rückkopplung nach einer Cochlea-Implantation ist nicht immer ausreichend für eine gute Qualität der Sprachproduktion bei Personen mit einer langen Hörverlustdauer bis zur Versorgung oder einem frühen Auftreten eines Hörverlustes. Im Gegensatz dazu erhöht die CI-Versorgung kurz nach einem hochgradigen oder kompletten Hörverlust die Wahrscheinlichkeit, dass ein CI-Nutzer eine gute Sprachqualität aufrechterhalten kann. Die Rehabilitation sollte sich insbesondere auf die Sprachproduktionsfähigkeiten von CI-Nutzern konzentrieren, die vor oder während des Spracherwerbs ertaubten, und auf diejenigen, die vor der CI-Bereitstellung lange Zeit ein unzureichendes oder nicht ausreichend kompensiertes Gehör hatten.

Die automatische Spracherkennung kann ein nützliches Werkzeug zur Beurteilung der Sprachqualität sein und kann die Notwendigkeit einer Sprach- oder Hörrehabilitation bei CI-Nutzern identifizieren.

7. Danksagung

Es gibt sehr viele Menschen, die mich bei meinem Vorhaben diese Dissertation und das dazugehörige Paper zu schreiben unterstützt haben. Ihnen allen gebührt mein größter Dank.

Ich bedanke mich vor allem bei meiner Doktormutter Frau Professor Dr. med. M. Schuster von der Ludwig-Maximilians-Universität München, Campus Großhadern, für Ihre ausgezeichnete Betreuung und Unterstützung. Sie stand mir stets mit Rat und Tat zur Seite. Sie konnte mich motivieren, auch wenn der initiale Versuch der Veröffentlichung einer kumulativen Doktorarbeit seit 2014 durch häufige Änderungsvorschläge der Reviewer in die Länge gezogen wurde. Schlussendlich erhielten wir für das Paper mit dem Titel „Speech Production Quality of Cochlear Implant Users with Respect to Duration and Onset of Hearing Loss“ im Juni 2017 die Veröffentlichungszusage des ORL(77). Die zweite Veröffentlichung („Speech Production Quality and Speech Perception of Adult Cochlear Implant Users“) ist noch ausstehend.

Danke an dieser Stelle an Frau Naomi Zens für die Hilfestellung bei der Übersetzung des ersten Papers ins Englische als „native English speaker“.

Mein Dank gilt auch den CI-Chirurgen Professor Dr. med. J. Müller und PD Dr. Martin Hempel von der Ludwig-Maximilians-Universität München, Campus Großhadern.

Ein herzliches Dankeschön an Herrn Tobias Bocklet und Prof. Dr. E. Nöth vom Lehrstuhl für Mustererkennung der Technischen Fakultät von der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg für Ihre Mitarbeit und Anpassung des ASR-Systems.

Ich danke Herrn PD Dr. F. Schiel und Frau Dr. V. Neumeyer vom Institut für Phonetik und Sprachbildung der Ludwig-Maximilians-Universität München. Ihre Vorbereitungen und Mithilfe bei den Auswertungen haben sehr geholfen.

Ebenfalls ein großes Dankeschön an Frau Dr. biol. hum. Dipl. Math. E. Hoster vom Institut für medizinische Informationsverarbeitung Biometrie und Epidemiologie (IBE) der Ludwig-Maximilians-Universität München für die Hilfe bei der statistischen Auswertung der Ergebnisse.

Vielen Dank an meinen Chefarzt Herrn Dr. med. N. Heinze vom Lehrklinikum der Charité in Frankfurt Oder, der mir während meiner Ausbildung zur HNO-Fachärztin den nötigen Freiraum einräumte und für inhaltliche Fragen zur Seite stand.

Abschließend danke ich meiner Familie und meinem Partner, insbesondere meinen Eltern (Nihal und Rolf Ruff), die mich während des gesamten Studiums emotional und finanziell unterstützt haben; sie hatten immer ein offenes Ohr.

8. Literaturverzeichnis

1. **Leder, S.B. & Spitzer, J.B.** A perceptual evaluation of the speech of adventitiously deaf adult males. *Ear and Hearing*, 11(3). 1990, S. 169–175.
2. **Bittencourt, A.G., Giantomassi Della Torre, A. A., Ricardo Ferreira Bento, R. F., Tsuji R., K., & de Brito, R.** Prelingual deafness: Benefits from cochlear implants versus conventional hearing aids. *Int Arch Otorhinolaryngol*, 16(3). 2012, S. 387–390.
3. **Montes, F., Peñaranda, A., Correa, S., Peñaranda, D., García, J.M., Aparicio, M.L., Varela, A.R., Castillo, M.** Cochlear Implants Versus Hearing Aids in a Middle-Income Country: Costs, Productivity, and Quality of Life. *Otol Neurotol.*, 38(5). 2017, S. e26-e33. doi: 10.1097/MAO.0000000000001393.
4. **Svirsky, M.A., Sagi, E., Meyer, T.A., Kaiser, A.R. & Teoh, W.S.** A mathematical model of medial consonant identification by cochlear implant users. *Journal of the Acoustic Society of America*, 129(4). 2011, S. 2191–2200.
5. **Stevens, K.N.** Diverse acoustic cues at consonantal landmarks. *Phonetica*, 57. 2000, S. 139–151.
6. **Teoh, S.W., Neuburger, H.S. & Svirsky, M.A.** Acoustic and electrical pattern analysis of consonant perceptual cues used by cochlear implant users. *Audiology & Neurootology*, 8. 2003, S. 269–285.
7. **Perkell, J., Lane, H., Svirsky, M. & Webster, J.** Speech of cochlear implant patients: a longitudinal study of vowel production. *Journal of the Acoustic Society of America*, 91(5). 1992, S. 2961–2978.
8. **Tye-Murray, N. & Kirk, K.** Vowel and diphthong production by young users of cochlear implants and the relationship between the phonetic level evaluation and spontaneous speech. *Journal of Speech Hearing Research*, 36. 1993, S. 488–503.
9. **Matthies, M., Svirsky, M., Lane, H. & Perkell, J.** A preliminary study of the effects of cochlear implants on the production of sibilants. *Journal of the Acoustic Society of America*, 96 (3). 1994, S. 1367–1373.

10. **Lane, H., Wozniak, J., Matthies, M., Svirsky, M. & Perkell, J.** Phonemic resetting versus postural adjustments in the speech of cochlear implant users: An exploration of voice-onset time. *Journal of the Acoustic Society of America*, 98 (6). 1995, S. 3096–3106.
11. **Lane, H., Matthies, M., Perkell, J., Vick, J. & Zandipour, M.** The effects of changes in hearing status in cochlear implant users on the acoustic vowel space and cv coarticulation. *Journal of Speech Language Hearing Research*, 44. 2001, S. 552–563.
12. **Schenk, B., Baumgartner, W. & Hamzavi, J.** Changes in Vowel Quality after Cochlear Implantation. *ORL*, 65. 2003, S. 184–188.
13. **Lane, H., Denny, M., Guenther, F.H., Hanson, H.M., Marrone, M., Matthies, M.L., Perkell, J.S., Stockmann, E., Tiede, M., Vick, J. & Zandipour, M.** On the Structure of Phoneme Categories in Listeners With Cochlear Implants. *Journal of Speech Language Hearing Research*, 50. 2007, S. 2–14.
14. **Yang, J., Brown, E., Fox, R.A., Xu, L.** Acoustic properties of vowel production in prelingually deafened Mandarin-speaking children with cochlear implants. *J Acoust Soc Am.*, 138(5). 2015, S. 2791-9. DOI: 10.1121/1.4932165.
15. **Uchanski, R. & Geers, A.** Acoustic Characteristics of the Speech of Young Cochlear Implant Users: A Comparison with Normal-Hearing Age-Mates. *Ear and Hearing*, 24. 2003, S. 90–105.
16. **Gould, J., Lane, H., Vick, J., Perkell, J., Matthies, M., & Zandipour, M.** Changes in Speech Intelligibility of Postlingually Deaf Adults after Cochlear Implantation. *Ear and Hearing*, 22. 2001, S. 453–460.
17. **Langereis, M.C., Dejonckere, P.H., van Olphen, A.F. & Smoorenburg, G.F.** Effect of cochlear implantation on nasality in post-lingually deafened adults. *Folia Phoniatrica et Logopedica*, 49(6). 1997, S. 308–314.
18. **Neumeyer, V., Harrington, J. & Draxler, C.** An acoustic analysis of the vowel space in young and old cochlear-implant speakers. *Clinical Linguistics & Phonetics*, 7(9). 2010, S. 734–741.

19. **Horga, D. & Liker, M.** Voice and pronunciation of cochlear implant speakers. *Clinical Linguistics & Phonetics*, 20(2/3). 2006, S. 211–217.
20. **Lazard, D.S., Vincent, C., Venail, F., et al.** Pre-, Per- and Postoperative Factors Affecting Performance of Postlinguistically Deaf Adults Using Cochlear Implants: A New Conceptual Model over Time. *PLOS ONE*, 7(11). 2012, S. e48739.
21. **Schiavetti, N.** Scaling procedures for the measurement of speech intelligibility. In: *Intelligibility in speech disorders: Theory, measurement and management*, John Benjamins, Philadelphia. 1992, S. 11-34.
22. **Ziegler, W., Hartmann, E. & Cramon, D.Y.** Word identification testing in the diagnostic evaluation of dysarthric speech. *Clinical Linguistics & Phonetics*, 2. 1998, S. 291–308.
23. **Kitzing, P., Maier, A., Ahlander, V.L.** Automatic speech recognition (ASR) and its use as a tool for assessment or therapy of voice, speech, and language disorders. *Logopedics Phoniatrics Vocology*, 34(2). 2009, S. 91-6.
24. **Maier, A., Haderlein, T., Eysholdt, U., Rosanowski, F., Batliner, A., Schuster, M., & Nöth, E.** PEAKS – A System for the Automatic Evaluation of Voice and Speech Disorders. *Speech Communication*, 51(5). 2009, S. 425–437.
25. **Windrich, M., Maier, A., Kohler, R., Nöth, E., Nkenke, E., Eysholdt, U. & Schuster, M.** Automatic quantification of speech intelligibility of adults with oral squamous cell carcinoma. *Folia Phoniatica et Logopedica*, 60(3). 2008, S. 151–156.
26. **Jens Huppelsberg, Kerstin Walter.** *Kurzlehrbuch Physiologie*. 2. korrigierte Auflage, 2005.
27. **Erwin- Josef Speckmann, Jürgen Hescheler, Rüdiger Köhling.** *Physiologie*. 5. Auflage, 2008.
28. [Online] <https://viamedici.thieme.de/lernmodule/physik/schallwellen+und+hören>.
29. [Online]
<https://viamedici.thieme.de/lernmodule/anatomie/ohr+aufbau+und+funktionen+im+überblick>.

30. **Gerhard Aumüller, Gabriela Aust, Andreas Doll, Jürgen Engele, Joachim Kirsch, Siegfried Mense, Dieter Reißig, Jürgen Salvetter, Wolfgang Schmidt, Frank Schmitz, Erik Schulte, Katharina Spanel-Borowski, Werner Wolff, Laurenz J. Wurzinger, Hans- Gerhard Zil.** *Duale Reihe Anatomie*. 2007.
31. **Trepel, Martin.** *Neuroanatomie Struktur und Funktion*. 4. Auflage, 2008.
32. [Online] <http://slideplayer.org/slide/656449/1/images/8/Schalltransduktion+im+Innenohr.jpg>.
33. **Hans Behrbohm, Oliver Kaschke, Tadeus Nawka.** *Kurzlehrbuch Hals-Nasen-Ohren-Heilkunde*. 2009.
34. [Online] <http://docplayer.org/docs-images/49/25501590/images/12-0.jpg>.
35. **Jürgen Strutz, Wolf Mann.** *Praxis der HNO-Heilkunde, Kopf- und Halschirurgie*. 2. vollständig überarbeitete und erweiterte Ausgabe, 2010.
36. **Zahnert, T.** The Differential Diagnosis of Hearing Loss. *Dtsch Arztebl Int*, 108(25). 2011, S. 433-44, DOI: 10.3238.
37. [Online] http://www.who.int/pbd/deafness/hearing_impairment_grades/en/.
38. [Online] http://www.oesb-dachverband.at/uploads/media/DSB_SH_Statistik2011.pdf.
39. [Online] <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs300/en/>.
40. **Röttgen, Prof. Dr. Marion Hermann-.** *Cochlea- & Mittelohr-implantate – Ein Ratgeber für Betroffene und Therapeuten*. 2009.
41. Cochlea- Implantat Versorgung und zentral- auditorische Implantate. *Leitlinie der Deutschen Gesellschaft für Hals- Nasen- Ohren- Heilkunde*. s.l. : Kopf- und Hals- Chirurgie e.V., Bonn, Stand 05/2012.
42. [Online] <http://www.hoer-wunder.de/cochlea-implantat/>.
43. **Zenner, Hans-Peter.** *Praktische Therapie von HNO-Krankheiten, Operationsprinzipien, konservative Therapie, Chemo- und Radiochemotherapie, Arzneimittel- und physikalische*

Therapie, Rehabilitation und psychosoziale Nachsorge. 2. vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage, 2008.

44. **Jürgen Theissing, Gerhard Rettinger, Jochen A. Werner, Begründet von Gerhard Theissing, Mit Beiträgen von Florian Hoppe und Claudia Rudack.** *HNO-Operationslehre, Mit allen wichtigen Eingriffen*. 4. vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage, 2006.

45. **Jürgen Wendler, Wolfram Seidner, Ulrich Eysholdt.** *Lehrbuch der Phoniatrie und Pädaudiologie*. 4. völlig überarbeitete Auflage, 2005.

46. **Beat Pfister, Tobias Kaufmann.** *Sprachverarbeitung - Grundlagen und Methoden der Sprachsynthese und Spracherkennung*. 2. aktualisierte und erweiterte Auflage, 2017.

47. **JK, Moore.** Maturation of human auditory cortex: implications for speech perception. *Ann Otol Rhinol Laryngol*, 189. 2002, S. 7-10.

48. [Online] https://www.researchgate.net/figure/29745617_fig1_Abb-11-2-Schnitt-durch-den-Sprechapparat-Benannt-sind-die-an-der-Spracherzeugung.

49. **Euler, Stephan.** *Grundkurs Spracherkennung- Vom Sprachsignal zum Dialog- Grundlagen und Anwendungen verstehen- mit praktischen Übungen*. 1.Auflage, 2006.

50. [Online] <https://ppt-online.org/224436Konsonanten>.

51. [Online] <http://docplayer.org/8555200-Martin-luther-universitaet-halle-wittenberg.html>.

52. **Guenther, F. H., Ghosh, S. S., & Tourville, J. A.** Neural modeling and imaging of the cortical interactions underlying syllable production. *Brain and Language*, 96. 2006, S. 280–301.

53. **Menard, L., Polak, M., Denny, M., Burton, E., Lane, H., Matthies, M. L., Marrone, N., Perkell, J. S., Tiede, M., & Vick, J.** Interactions of speaking condition and auditory feedback on vowel production in postlingually deaf adults with cochlear implants. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 121 (6). 2007, S. 3790–3801.

54. **Perkell, J. S., Zandipour, M., Matthies, M. L., & Lane, H.** Economy of effort in different speaking conditions. I: A preliminary study of intersubject differences and modeling issues. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 112. 2002, S. 1627–1641.

55. **Schukat-Talamazzini, E.G. & Niemann, H.** Das ISADORA-System- ein akustisch-phonetisches Netzwerk zur automatischen Spracherkennung. *Radig B, ed., Mustererkennung* 290. 1991, S. 251–258.
56. **Gallwitz, F., Niemann, H. & Nöth, E.** Speech recognition- state of the art, application, and future prospects. *Wirtschaftsinformatik*, 41(6). 1999, S. 538–547.
57. **Schuster, M., Haderlein, T., Nöth, E., Lohscheller, J., Eysholdt, U., & Rosanowski, F.** Intelligibility of Laryngectomees' Substitute Speech: Automatic Speech Recognition and Subjective Rating. *European Archives of Oto-Rhino-Laryngology*, 263(2). 2006, S. 188–193.
58. **Schuster, M., Maier, A., Haderlein, T., Nkenke, E., Wohlleben, U., Rosanowski, F., Eysholdt, U., & Nöth, E.** Evaluation of Speech Intelligibility for Children with Cleft Lip and Palate by Means of Automatic Speech Recognition. *International Journal of Pediatric Otorhinolaryngology*, 70. 2006, S. 1741–1747.
59. **Haderlein, T., Eysholdt, U., Riedhammer, K., Nöth, E., & Rosanowski, F.** Automatisierung des Post-Laryngektomie-Tests PLTT. *Aktuelle phoniatische Aspekte, Berlin, Germany*. 2007, S. 66-69.
60. **Cosetti, M. & Roland, J.T. Jr.** Cochlear implantation in the very young child: issues unique to the under-1 population. *Trends of Amplification*, 14(1). 2010, S. 46–57.
61. **Mayr, S., Burkhardt, K., Schuster, M., Maier, A., Rogler, K., Iro, H.** The use of automatic speech recognition showing the influence of nasality on speech intelligibility. *European Archives of Otorhinolaryngology*, 267(11). 2010, S. 1719–1725.
62. **Sari, E., Ucar, C., Türk, O., Kurtulmus, H., Altug, H.A., Pocan, S.** Treatment of a patient with cleft lip and palate using an internal distraction device. *Cleft Palate Craniofacial Journal*, 45(5). 2008, S. 552–60.
63. **Paal, S., Reulbach, U., Strobel-Schwarthoff, K., Nkenke, E., Schuster, M.** Evaluation of speech disorders in children with cleft lip and palate. *Journal of Orthofacial Orthopedics*, 66. 2005, S. 270–278.

64. **Maier, A., Höning, F., Bocklet, T., Nöth, E., Stelzle, F., Nkenke, E. & Schuster, M.** Automatic detection of articulation disorders in children with cleft lip and palate. *Journal of the Acoustic Society of America*, 126(5). 2009, S. 2589-2602.
65. **Brown, K.D. & Balkany, T.J.** Benefits of bilateral cochlear implantation: a review. *Current Opinion in Otolaryngology, Head and Neck Surgery*, 15. 2007, S. 315–318.
66. **Culling, J.F., Jelfs, S., Talbert, A., Grange, J.A. & Backhouse, S.S.** The Benefit of Bilateral Versus Unilateral Cochlear Implantation to Speech Intelligibility in Noise. *Ear and Hearing*, 33(6). 2012, S. 673–682.
67. **Miranda, P., Sampaio, A., Lopes, R., Ramos Venosa, A. & de Oliveira, C.** Hearing preservation in cochlear implant surgery. *International Journal of Otolaryngology*. 2014, S. 468515.
68. **Finley, C., Holden, T., Holden, L., Whiting, B., Chole, R., Neely, G., Hullar, T. & Skinner, M.** Role of electrode placement as a contributor to variability in cochlear implant outcomes. *Otology Neurotology*, 29(7). 2008, S. 920–928.
69. **Berrettini, S., Forli, F., & Passetti, S.** Preservation of residual hearing following cochlear implantation: comparison between three surgical techniques. *Journal of Laryngology and Otology*, 122(3). 2008, S. 246–252.
70. **An, Y.S., Kim, S.T., & Chung, J.W.** Preoperative Voice Parameters Affect the Postoperative Speech intelligibility in Patients with Cochlear Implantation. *Clinical and Experimental Otorhinolaryngology*, 5(1). 2012, S. 69–72.
71. **Gordon, K.A., Wong, D.D., Valero, J., Jewell, S.F., Yoo, P. & Papsin, B.C.** Use it or lose it? Lessons learned from the developing brains of children who are deaf and use cochlear implants to hear. *Brain Topography*, 24(3-4). 2011, S. 204–219.
72. **Petersen, B., Gjedde, A., Wallentin, M., & Vuust, P.** Cortical Plasticity after Cochlear Implantation. *Neural Plasticity*. 2013, S. 318521.
73. **Wilpon, J.G. & Jacobsen, C.N.** A study of speech recognition for children and the elderly. *Proc. of ICASSP*. 1996, S. 349–352.

74. **Peng, S.-C., Tomblin, J.B., Spencer, L.J. & Hurtig, R.R.** Imitative Production of Rising Speech Intonation in Pediatric Cochlear Implant Recipients. *Journal of Speech Language Hearing Research*, 50. 2007, S. 1221–1227.
75. **Tanamati, L.F., Bevilacqua, M.C. & Costa, O.A.** Cochlear implant in postlingual children: functional results 10 years after the surgery. *Brazilian Journal of Otorhinolaryngology*, 78(2). 2012, S. 103–110.
76. **Neumeyer, V.** Akustische Analysen der Sprachproduktion von CI-Trägern. *Dissertation, LMU München: Fakultät für Sprach- und Literaturwissenschaften*. 2015.
77. **Ruff, S., Bocklet, T., Nöth, E., Müller, J., Hoster, E., Schuster, M.** Speech Production Quality of Cochlear Implant Users with Respect to Duration and Onset of Hearing Loss. *ORL J Otorhinolaryngol Relat Spec*. 2017;79(5):282-294. doi: 10.1159/000479819.
78. **McQuarrie, L. & Parilla, R.** Phonological representation in deaf children: rethinking the „functional equivalence“ hypothesis. *J Deaf Stud Deaf Educ.*, 14(2). 2009, S. 137-154.
79. **Osberger, M.J. & Fisher, L.** Preoperative predictors of postoperative implant performance in children. *Ann Otol Rhinol Laryngol* 109(suppl 185). 2000, S. 44–46.
80. **Perkell, J., Numa, W., Vick, J., Lane, H., Balkany, T. & Gould, J.** Language-Specific, Hearing-related Changes in Vowel Spaces: A Preliminary Study of English- and Spanish-Speaking Cochlear Implant Users. *Ear and Hearing* , 22. 2001, S. 461–470.

9. Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

9.1 Abbildungen

Abbildung 1: Darstellung der Hörschwelle und Isophone (28)

Abbildung 2: Ohranatomie (29)

Abbildung 3: Schalltransduktion im Innenohr (32)

Abbildung 4: Die Hörbahn (34)

Abbildung 5: Aufbau eines Cochlea Implants (42)

Abbildung 6: Der Sprechapparat (48)

Abbildung 7: Das deutsche Vokalviereck (50)

Abbildung 8: Das DIVA-Modell (52)

Abbildung 9: Graphische Darstellung im Boxplot der Gruppenvergleiche der CI-Nutzer

9.2 Tabellen

Tabelle 1: WHO-Einteilung nach Grad der Schwerhörigkeit

Tabelle 2: Die Konsonanten des Deutschen und Französischen (51)

Tabelle 3: Gruppenaufteilung der 50 CI-Nutzer

Tabelle 4: Daten der Cochlea-Implantat-Nutzer-Gruppen

Tabelle 5: Korrelationsanalyse zwischen WR und den Merkmalen der Probanden

Tabelle 6: Worterkennungsrates der CI-Nutzer und der altersangepassten Kontrollgruppe